This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

University of Wisconsin
LIBRARY
Class TNN
Book .T15

RECHERCHES

SUR LES

ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

DROITS DE PROPRIÉTÉ ET DE TRADUCTION RÉSERVÉS.

RECHERCHES

THÉORIQUES ET PRATIQUES

SUR LES

ACCUMULATEURS

ÉLECTRIQUES,

PAR

RENÉ TAMINE,

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES.

MONS,

HECTOR MANCEAUX, IMPRIMEUR-ÉDITEUR.

PARIS. — BAUDRY, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15.

1885.

4.276
9 Mr'97
TNN
.T15
6970404

PRÉFACE.

Depuis que M. Planté a publié, en 1879, ses recherches sur *les piles secondaires*, dites *accumulateurs électriques*, on n'a fait paraître aucun ouvrage traitant, d'une façon plus ou moins complète, de ce genre d'appareils. C'est à peine si l'on trouve, disséminés dans les revues périodiques, un certain nombre d'articles qui les concernent. L'on paraît vouloir s'imposer une réserve outrée sur toutes les questions relatives à l'emploi des accumulateurs. Cependant les documents que l'on possède peuvent déjà former un intéressant dossier.

Nous répondons aujourd'hui à un désir qui nous a souvent été exprimé en donnant, dans ce volume, un exposé aussi complet que possible des recherches théoriques et pratiques qui ont été faites jusqu'ici sur les accumulateurs électriques.

Nous avons cru utile de faire connaître, dans une introduction sommaire, les notions élémentaires dont on fait usage dans le langage des électriciens.

Ce livre est ensuite divisé en trois parties.

La première comprend, dans un premier chapitre, une étude des courants secondaires.

Un deuxième chapitre contient la description des systèmes qui ont attiré l'attention du monde scientifique ou du monde industriel.

La deuxième partie traite du mode d'emploi des accumulateurs, de leurs propriétés et de leur mérite. Cette partie est la plus importante, et nous espérons qu'elle pourra faciliter les expériences de ceux qui voudront se livrer à l'étude des couples secondaires.

Enfin, la troisième partie renferme un exposé des applications qui ont été réalisées et de celles qui seront faites prochainement.

Les accumulateurs électriques, après avoir été à la mode, ont été l'objet des critiques les plus vives. Au mois de décembre dernier, on lisait, dans le *Moniteur industriel*, que « les accumulateurs avaient fait leur temps ».

On nous dira peut-être que, dans ces conditions, le moment est mal venu de livrer cet ouvrage à la publicité.

Nous avouons, en toute franchise, que nous avons une confiance illimitée et une foi entière dans l'avenir des accumulateurs. Peu nous importent les sarcasmes dont on voudra bien nous gratifier au sujet de cet optimisme que nous professons hautement dans leurs applications. Nous laisserons parler l'avenir, en nous rappelant que cette confiance a sa source dans une étude que nous avons poursuivie avec persévérance pendant plus de quatre années, et en nous contentant d'éprouver la satisfaction de voir les expériences de chaque jour apporter successivement une éclatante confirmation aux conclusions de ce livre.

RECHERCHES THÉORIQUES & PRATIQUES

SUR LES

ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

INTRODUCTION.

§ 1.

DÉFINITIONS. — PRINCIPES.

Un accumulateur d'électricité, plus connu, dans la science, sous le nom de *pile secondaire,* est un appareil qui, après avoir subi une certaine opération appelée *la charge,* acquiert temporairement les propriétés des piles primaires dites *hydro-électriques.*

Les piles hydro-électriques, de même que les accumulateurs *chargés,* sont des appareils composés de parties solides et de parties liquides qui, en utilisant des actions chimiques, produisent de l'énergie électrique.

Disons tout d'abord qu'un corps est *électrisé,* lorsqu'il est susceptible d'attirer les corps légers.

Il n'existe qu'une seule espèce d'électricité, attendu que l'électricité est une forme de mouvement, absolument comme la lumière et la chaleur. Cependant la

plupart des électriciens considèrent, du moins pour la facilité du discours, une *électricité positive* et une *électricité négative*. Il doit être bien entendu que ce sont deux états électriques différents qui ne dépendent que de l'augmentation ou de la diminution de quelque chose que l'on est convenu d'appeler *électricité*.

Les considérations saillantes qui forment la base de la théorie des piles primaires se rencontrent également dans l'étude des accumulateurs.

Aussi dans le but d'insister sur leur importance, nous les énoncerons sous la forme de principes.

Prenons la première pile, par ordre chronologique, la pile de Volta, et voyons ce qui la caractérise.

La pile de Volta est formée d'une lame de zinc et d'une lame de cuivre séparées l'une de l'autre et plongeant dans un bain d'eau salée ou d'eau acidulée par l'acide sulfurique.

Lorsque cette pile travaille, l'eau est décomposée en ses deux éléments constitutifs : en gaz oxygène, d'une part, et en gaz hydrogène, d'autre part ; l'oxygène se porte sur l'élément zinc pour former de l'oxyde de zinc ; cet oxyde de zinc, en présence de l'acide sulfurique, se combine avec celui-ci et engendre du sulfate de zinc qui se dissout dans le liquide. Quant à l'hydrogène, il se porte sur la lame de cuivre ; et comme ce métal ne subit guère d'action chimique sensible, l'hydrogène se dégage à la surface du bain. Si le cuivre était oxydé,

l'hydrogène le réduirait. Pendant que ces actions chimiques se produisent, la lame de zinc s'électrise négativement et la lame de cuivre positivement.

En définitive, la pile de Volta est composée de deux éléments à surface hétérogène auxquels on a donné le nom d'*électrodes*. Ces électrodes sont séparées par une couche de liquide qui se décompose sous l'influence du travail de la pile. Par suite de cette décomposition, l'une des électrodes s'oxyde et la deuxième subit l'action de l'hydrogène qui est un élément essentiellement réducteur.

Ce dernier point est d'une importance capitale : il s'applique aussi bien aux accumulateurs qu'à toutes les piles primaires hydro-électriques; c'est pourquoi nous en ferons un principe que nous énoncerons comme suit :

Lorsqu'une pile primaire hydro-électrique ou secondaire fonctionne, la décomposition du liquide a pour conséquence d'oxyder l'une des électrodes et de réduire l'autre électrode.

La première qui s'oxyde sera appelée *électrode négative* et représentera *le pôle négatif* de la pile; la deuxième qui se réduit constituera *l'électrode positive* et représentera *le pôle positif*[1].

Quand deux semblables électrodes sont réunies par un *conducteur*, c'est-à-dire un fil métallique capable

---

1. L'on trouvera dans beaucoup de traités qu'à l'électrode négative correspond le pôle positif et qu'à l'électrode positive correspond le pôle négatif. Les raisons que l'on fera valoir pour le choix de ces dénominations peuvent

de conduire l'électricité, s'il y a excès de l'une des électricités sur l'autre, on dit qu'il y a *décharge électrique,* et le *courant électrique* n'est autre chose que l'état du fil parcouru par une décharge continue.

La cause qui produit le courant électrique, c'est ce que l'on nomme la force *électro-motrice.*

L'état des substances solides et liquides intervient seul pour déterminer la grandeur de la force électro-motrice d'une pile ou d'un accumulateur. Si, pendant le travail d'un accumulateur, cet état qui est la cause du courant électrique vient à changer, l'on conçoit que la force électro-motrice de l'élément se modifie. En général, les modifications de ce genre ont pour effet d'affaiblir la force électro-motrice. Pour expliquer cette diminution, l'on admet qu'il se produit un certain effet électrique, appelé *polarisation,* ou *force de polarisation,* qui agit en sens inverse de la force électro-motrice de la pile.

Lorsque la force électro-motrice ne subit aucune modification, on dit que l'élément est à *débit constant.*

Dans les applications industrielles, la polarisation des accumulateurs joue un rôle immense; nous y reviendrons fréquemment dans la suite.

Il n'est peut-être pas sans intérêt de faire remarquer

---

paraître excellentes, mais il est incontestable qu'elles prêtent à confusion. Pour éviter cet inconvénient, nous adoptons les désignations indiquées ci-dessus. C'est d'ailleurs la manière de voir que tendent à admettre depuis quelque temps la majorité des praticiens.

que, déjà dans son *Traité des piles électriques*, M. Niaudet, en parlant de la polarisation des éléments primaires, disait : « Il est très important de bien comprendre tout ce qui tient à cette question ; *là est toute la difficulté du perfectionnement des piles.* »

On pourrait presque en dire autant des accumulateurs ; aussi, vu l'importance que l'on doit attribuer à la diminution de la force électro-motrice lorsqu'un changement survient dans la nature des substances constitutives de la pile, nous dirons, sous la forme d'un deuxième principe :

Qu'une pile primaire ou secondaire est constante lorsque la polarisation est nulle ou insensible. Elle est à débit variable, quand cette force de polarisation ne peut être négligée.

La polarisation est ce que l'on désigne quelquefois sous le nom de *résistance active*. Les *résistances passives* comprennent tous les obstacles qui s'opposent au passage du courant.

L'ensemble formé par la pile primaire ou secondaire et les conducteurs constitue un *circuit électrique*.

Le circuit est *ouvert* lorsqu'il présente une solution de continuité ; on dit alors que *le courant ne passe pas*. Au contraire, le circuit est *fermé* lorsque les conducteurs sont continus ; le courant peut, dans ce cas, *passer* ou *circuler*.

En résumé, dans une pile primaire ou secondaire, il se produit un *courant électrique* plus ou moins intense,

possédant une certaine *force électro-motrice* et animé d'une puissance de propagation qui dépend des *résistances du circuit.*

Il est nécessaire, croyons-nous, d'entrer dans quelques explications au sujet de ces divers termes qui se rencontrent à chaque instant dans l'étude de l'électricité.

§ 2.

INTENSITÉ DU COURANT ÉLECTRIQUE.

En règle générale, l'expérience montre que lorsqu'un liquide est traversé par un courant électrique, ce liquide se décompose. Il constitue alors un *électrolyte.*

Prenons l'appareil représenté par la figure 1.

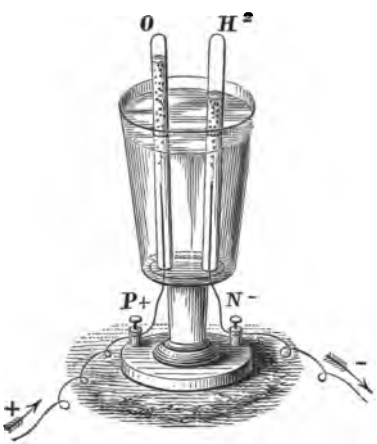

Figure 1.

C'est un *voltamètre* composé d'un vase en verre contenant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique; deux fils de platine dressés verticalement à l'intérieur du vase traversent le fond de celui-ci et viennent se fixer à deux bornes qui reçoivent les fils conducteurs

du courant électrique. Deux éprouvettes en verre, remplies d'eau au préalable, sont disposées au-dessus des fils de platine.

Comme l'eau acidulée est conductrice de l'électricité, il s'ensuit que le courant n'est pas interrompu par suite de l'écartement des fils de platine.

Quand le courant passe dans le sens indiqué par les flèches, on voit immédiatement des bulles de gaz s'élever à la partie supérieure des deux éprouvettes. Si l'on recueille ces gaz, on reconnaît que l'oxygène s'est porté au fil de platine qui est en relation avec la borne positive et que l'hydrogène s'est rendu à l'autre fil qui est relié à la borne négative. On constate, en outre, que le volume d'hydrogène est sensiblement double du volume d'oxygène, ce qui se conçoit aisément, attendu que la formule chimique de l'eau, H^2O, montre que deux molécules d'hydrogène sont associées à une molécule d'oxygène.

Le courant électrique a donc effectué, dans ce cas, un travail de décomposition chimique.

Supposons qu'au bout de quelques instants l'on supprime le courant, appelé *courant primaire*, qui a produit la décomposition. Nous avons en présence deux fils de platine *chargés de gaz différents* et séparés par une couche de liquide conducteur de l'électricité. Ce sont deux véritables électrodes à surface hétérogène. De plus, dans cet état, ces deux électrodes ont chacune un degré d'affinité particulier pour les éléments constitutifs du liquide. Il s'ensuit donc qu'un courant électrique pourra prendre naissance lorsqu'on réunira les

bornes P et N par un fil métallique et que ce courant persistera aussi longtemps que les deux électrodes seront dans un état différent.

Nous voyons par conséquent que, dans ces conditions, le voltamètre est un véritable générateur d'énergie électrique absolument comme la pile primaire ; nous dirons alors que le voltamètre *est chargé.*

Cette expérience qui va nous permettre de mesurer l'intensité des courants électriques, est doublement intéressante ; car, comme on le verra plus loin, c'est elle qui a été le point de départ des recherches qui ont été faites sur les accumulateurs électriques.

Si l'on examine attentivement ce qui se passe lorsque s'accroît l'intensité du courant qui effectue la décomposition de l'eau acidulée, on observe que la quantité de gaz oxygène et hydrogène, c'est-à-dire la quantité d'actions chimiques augmente dans l'unité de temps.

Il ne faut pas confondre la quantité d'électricité représentée en général par la lettre Q avec l'intensité I du courant électrique. L'intensité I n'est que la quantité d'électricité qui passe *par seconde* dans un conducteur ; si le courant agit pendant un temps t, on a la formule $Q = It$.

Faraday a reconnu que *dans l'unité de temps les actions chimiques sont proportionnelles aux intensités du courant.* Démontrons cette loi de la manière suivante.

Nous avons vu que le voltamètre chargé est un générateur de courant électrique. Supposons que l'on associe *en tension* plusieurs voltamètres analogues. L'association en tension se fait comme dans les piles primaires, en réunissant le pôle positif d'un élément au pôle négatif de l'élément suivant, puis le pôle positif de celui-ci au pôle négatif de son voisin, et ainsi de suite.

Soient (fig. 2) en A les voltamètres générateurs chargés; plaçons successivement dans le circuit extérieur

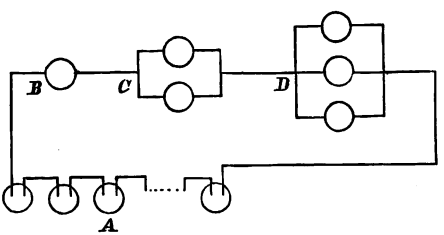

Fig. 2.

en B un voltamètre, en C deux voltamètres, et en D trois voltamètres; ces six voltamètres non chargés sont parfaitement identiques. Que va-t-il se passer?

Au point B le courant passe intégralement dans le voltamètre et effectue une décomposition du liquide; en C le courant se divise en deux dérivations égales; donc les intensités dans chacune de ces dérivations sont égales et ne valent chacune que la moitié de l'intensité constatée en B. Au point D, où se trouvent trois dérivations, l'intensité dans chacune des branches est égale au tiers de l'intensité totale passant en B.

S'il est vrai que les actions chimiques sont proportionnelles aux intensités du courant, l'on devra recueillir en C dans chacun des voltamètres placés sur les deux branches une quantité de gaz égale seulement à la moitié de celle que l'on obtient en B. Sur les dérivations faites en D, chaque voltamètre ne devra recevoir que le tiers de la quantité de gaz obtenue en B.

L'observation montre que ces égalités se vérifient; par conséquent, il y a *proportionnalité entre la quantité d'actions chimiques produites dans l'unité de temps et l'intensité du courant électrique.*

Il résulte de ce qui précède que le poids des gaz recueillis peut servir à mesurer l'intensité du courant électrique. Il suffit de mesurer le volume d'hydrogène qui se dégage par seconde et d'en déterminer le poids. Ce poids exprimé en milligrammes représente l'intensité du courant.

Ainsi, le voltamètre est un appareil capable de déterminer l'intensité du courant électrique, et par conséquent, en vertu de la relation $Q = It$, la quantité d'électricité Q qui passe dans un conducteur pendant un temps t.

Une deuxième loi découverte par Faraday peut s'énoncer comme suit :

Les quantités d'actions chimiques et d'électricité passant dans le courant sont les mêmes par unité de temps, 1° dans tous les points du conducteur, et 2° à l'intérieur de la pile génératrice, que celle-ci soit une pile primaire ou un accumulateur.

Pour démontrer le 1°, il suffit de placer, sur un circuit, à la suite les uns des autres, une série de voltamètres et de lancer ensuite le courant dans le circuit; on constate que la quantité de gaz obtenue dans chaque voltamètre est la même par unité de temps.

En ce qui concerne le 2°, voici comment on le démontre : Prenons des voltamètres générateurs associés en tension A et plaçons dans le circuit des voltamètres non chargés, en nombre inférieur à celui des éléments générateurs, on trouve alors que la quantité de gaz recueillie dans chacun des voltamètres du circuit extérieur est la même que celle qui est absorbée dans chaque élément de A, ce qui vérifie la loi.

Les lois des décompositions chimiques découvertes par Faraday ont une portée absolument générale. Il n'est pas nécessaire que le bain des voltamètres qui ont servi à recueillir les gaz oxygène et hydrogène, pour les démonstrations ci-dessus, soit de l'eau acidulée; un autre bain peut être employé. Alors il y a lieu de tenir compte de la loi suivante :

Lorsqu'un courant électrique agit successivement sur une suite de dissolutions, les poids des éléments séparés sont dans le même rapport que leurs équivalents chimiques.

Pour la démonstration de cette loi générale, il suffit d'intercaler dans le circuit, comme plus haut, une série de voltamètres renfermant, comme bains, des dissolutions salines de différents métaux : par exemple, du

sulfate de cuivre, du sulfate de zinc, du nitrate d'argent, etc. On constate que les quantités de métal déposées sur les fils négatifs sont respectivement proportionnelles aux équivalents chimiques de ces métaux.

Les lois de Faraday, qui viennent d'être examinées, seront mises à profit plus tard, lorsque nous étudierons la théorie électro-chimique des accumulateurs.

Il ne sera pas superflu d'ajouter que le courant électrique présente une analogie frappante avec les courants liquides, et nous croyons qu'une comparaison avec ces derniers permettra de retenir aisément les termes généralement employés dans le langage des électriciens.

Ce que nous avons dit de l'*intensité du courant électrique* suffit pour comprendre que *cette intensité* peut être assimilée au *débit* de l'eau; c'est le volume débité dans l'unité de temps.

La *quantité d'électricité* que nous avons représentée ci-dessus par la lettre Q est le volume débité pendant un temps *t*.

§ 3.

FORCE ÉLECTRO-MOTRICE.

La *force électro-motrice* est la cause du courant électrique; c'est elle qui met l'électricité en mouvement.

Continuons la comparaison avec les courants liquides.

A cet effet, nous allons prendre (fig. 3) deux réservoirs d'eau réunis inférieurement par une conduite sur laquelle se trouve une vanne qui nous permet d'établir la communication entre les deux réservoirs.

La vanne V étant baissée, nous supposerons que les niveaux sont différents.

Ouvrons la vanne : immédiatement nous voyons l'eau du réservoir A se diriger vers le réservoir B, et l'écoulement ne cesse que lorsque le niveau est devenu le

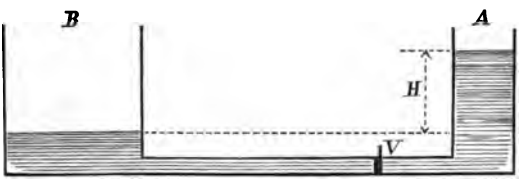

Fig. 3.

même dans A et B. Ce mouvement dépend de la charge d'eau H, c'est-à-dire de la *pression*.

Il est à remarquer que la direction de l'écoulement est indépendante de la grandeur des réservoirs.

Alors même que B serait 10 fois, 100 fois, etc. plus grand que A, le mouvement du liquide se ferait toujours du réservoir qui contient une plus grande hauteur d'eau vers celui où cette hauteur est moindre.

Le réservoir A débitera le liquide en raison de sa *pression* ou de sa *charge*.

Il en est absolument de même en électricité; le débit électrique est lié à la pression, qui s'appelle ici la *force électro-motrice*.

De même que la pression, en hydraulique, est déterminée par une différence de niveaux entre deux points, de même, en électricité, pour qu'il y ait production d'une force électro-motrice, il faut une différence de

niveaux électriques, ces niveaux constituant, d'après l'expression moderne, des *potentiels*.

La force électro-motrice est donc la hauteur de chute entre deux potentiels différents, et le courant électrique se dirige naturellement du plus grand potentiel au potentiel plus faible.

Si nous prenons la pile de Volta ou un accumulateur quelconque, on obtient, entre les pôles, une différence de potentiels qui est la force électro-motrice de l'élément.

La force électro-motrice est complètement indépendante des dimensions des électrodes; elle ne dépend que de l'état des matières qui entrent dans la composition de l'appareil. Au contraire, la quantité d'électricité varie avec la grandeur des électrodes mises en présence.

Pour obtenir une grande force électro-motrice, il faut donc choisir des matières qui possèdent une grande affinité chimique pour les éléments constitutifs du bain dont on fait choix.

Le premier principe que nous avons énoncé plus haut indique que, pendant le travail d'une pile primaire ou d'un accumulateur, l'une des électrodes s'oxyde et que l'autre se réduit.

Ce n'est pas seulement, comme certains le pensent, du degré d'activité de l'oxydation d'une électrode que dépend la force électro-motrice. Nous verrons, en étudiant les courants secondaires, que, dans certains cas, l'effet de la réduction l'emporte sur celui de l'oxydation.

C'est pourquoi nous dirons dès maintenant (c'est,

d'ailleurs, une conséquence du principe que nous venons de rappeler) que pour réaliser la plus grande force électro-motrice possible, un accumulateur ne doit contenir pour les deux électrodes que des substances possédant *respectivement et en même temps* une très grande tendance à l'oxydation et à la réduction.

Tout en réalisant ce maximum de force électro-motrice, il ne faut pas perdre de vue que celle-ci doit rester constante pendant tout le temps que dure le débit électrique, et quelle que soit l'intensité du courant produit. A quoi servirait, en effet, d'avoir un accumulateur possédant une force électro-motrice considérable, si le phénomène que nous avons désigné plus haut sous le nom de polarisation intervient aussitôt que commence la décharge.

Nous verrons ultérieurement que dans un grand nombre d'applications industrielles, il est plus avantageux de se servir d'un accumulateur impolarisable et ayant une force électro-motrice relativement satisfaisante, que d'un appareil possédant une plus grande force électro-motrice, mais se polarisant d'une façon sensible.

En résumé, les deux conditions que doit réaliser un accumulateur industriel, considéré au point de vue de sa force électro-motrice, sont les suivantes :

1° La force électro-motrice doit être la plus grande possible.

2° Elle doit rester constante quelle que soit l'intensité du courant de débit.

§ 4.

RÉSISTANCE.

Dans l'établissement d'une distribution d'eau, tout le monde sait que la nature des tuyaux de conduite n'est pas indifférente. Si la conduite est formée de tuyaux en grès, à surface rugueuse, l'écoulement de l'eau est gêné; de plus, si l'on doit amener le liquide à une grande distance, la pression initiale doit être considérable, car les résistances opposées à l'écoulement du fluide sont d'autant plus grandes que la longueur de la conduite est elle-même plus développée.

La même chose se présente en électricité. La nature du conducteur joue un rôle capital; ainsi le degré de conductibilité du cuivre étant, par exemple, exprimé par 100, celui du fer n'atteint que 12 environ et celui du plomb 8.

De plus, on reconnaît que si on interpose dans un circuit un voltamètre, la quantité de gaz qu'on y recueille diminue avec la longueur du circuit ainsi qu'avec la section du conducteur.

L'expérience prouve que la résistance est, d'une part, proportionnelle à la longueur du fil L et, d'autre part, inversement proportionnelle à sa section S et à un coefficient C qui représente le degré de conductibilité du conducteur, de sorte que l'on a :

$$R = \frac{L}{SC}.$$

Le rapport $\frac{1}{C}$ est la *résistance spécifique* du conducteur. La conductibilité électrique C est donc inversement proportionnelle à la résistance spécifique. La résistance R opposée au passage du courant n'est que la *résistance extérieure* à la pile. Mais la pile elle-même présente une certaine résistance intérieure *r* au courant qu'elle engendre. L'on s'explique *à priori* que les choses doivent se passer de la sorte. En effet, une pile primaire ou secondaire est une machine productrice de force; or, si l'on considère une machine quelconque, on sait que si elle produit de la force, elle en absorbe aussi une certaine partie résultant de la fonction même des organes.

Il est impossible de supprimer entièrement cette perte de force, mais les efforts des praticiens doivent tendre à la réduire à son minimum.

Dans les accumulateurs électriques, cette déperdition que nous venons de considérer, résulte de la *résistance intérieure* de l'appareil. Il est clair que nous devrons, dans les applications, tenir compte de cette résistance intérieure, mais nous chercherons à faire choix de substances qui la réduiront à sa plus faible valeur possible.

Lorsqu'on étudie les piles primaires, on trouve la loi suivante : *la résistance intérieure augmente avec la distance des électrodes et diminue quand on augmente les surfaces plongées.*

Lorsqu'on fait usage d'accumulateurs, l'expérience prouve que le rapprochement des électrodes a un effet plus prononcé que la grandeur des surfaces plongées.

Nous aurons l'occasion de revenir plus tard sur ce sujet, lorsque nous étudierons la polarisation des accumulateurs.

Lorsqu'un accumulateur est en charge ou en décharge, la nature chimique du bain varie évidemment.

On conçoit aisément, que les liquides n'ayant pas la même résistance spécifique, la résistance intérieure de l'accumulateur se modifie avec l'état chimique du bain.

Nous extrayons du *Traité des piles*, par Cazin, la valeur de la résistance *spécifique des substances les plus généralement employées.*

MÉTAUX PURS (MATTHIESSEN) A 0°.

Argent	recuit	0,016.
	écroui	0,017.
Cuivre		0,017.
Or		0,022.
Aluminium recuit		0,031.
Zinc comprimé		0,059.
Platine recuit		0,095.
Fer recuit		0,102.
Alliage (2 or, 1 argent)		0,114.
Nickel recuit		0,131.
Étain comprimé		0,139.
Plomb comprimé		0,207.
Antimoine comprimé		0,373.
Mercure		1,000.
Bismuth comprimé		1,379.

SUBSTANCES DIVERSES (MATTHIESSEN).

Graphite	de 24 à 418.
Coke	43.
Charbon de pile Bunzen	670.

LIQUIDES (BECQUEREL).

Acide azotique à 36° de l'aréomètre.	Température	13° ...	20560.
Solution saturée de sel marin.	»	13° ...	61160.
» » d'azotate de cuivre.	»	13° ...	214300.
» » de sulfate de zinc.	»	14° ...	334100.
» » de sulfate de cuivre.	»	9° ...	355700.
Eau distillée (Matthiessen)			93000000.
Eau avec $\frac{1}{20000}$ d'acide sulfurique			15000000.

§ 5.

RELATIONS ENTRE L'INTENSITÉ DU COURANT ÉLECTRIQUE, LA FORCE ÉLECTRO-MOTRICE ET LA RÉSISTANCE.

La première loi qui relie l'intensitée d'un courant électrique I, la force électro-motrice E et la résistance du circuit R a été établie théoriquement par Ohm. Un physicien français, Pouillet, en a donné le premier une sanction expérimentale.

Cette relation est la suivante :

$$I = \frac{E}{R}, \qquad (1)$$

formule que l'on peut traduire comme suit :

L'intensité d'un courant électrique est proportionnelle à la force électro-motrice et inversement proportionnelle à la résistance du circuit.

Une deuxième loi découverte par Joule est relative aux actions calorifiques des courants.

Si A désigne l'équivalent mécanique de la chaleur, H la quantité de chaleur dégagée pendant un temps t, Joule a trouvé la relation :

$$H = \frac{1}{A} RI^2 t. \qquad (2)$$

En remplaçant R ou I par la valeur tirée de la loi de Ohm, la formule (2) devient :

$$H = \frac{1}{A} EIt = \frac{1}{A} \frac{E^2}{R} t.$$

Si Q désigne la quantité d'électricité qui traverse le conducteur pendant le temps t, nous savons que $Q = It$; en faisant usage de la valeur de $I = \frac{Q}{t}$, la loi de Joule peut s'écrire :

$$H = \frac{1}{A} QE.$$

La formule (2) nous permet d'énoncer la loi de Joule de la manière suivante :

La quantité de chaleur développée dans un circuit électrique est proportionnelle à la résistance du circuit R, *au carré de l'intensité* I *et au temps* t *pendant lequel le courant passe, et inversement proportionnelle à l'équivalent mécanique de la chaleur.*

§ 6.

ASSOCIATION DES PILES PRIMAIRES ET SECONDAIRES.

Les éléments d'une batterie peuvent être associés en *quantité* et en *tension*. Ces deux associations présentent une analogie frappante avec les associations des réservoirs remplis de liquide.

A côté d'un réservoir A (fig. 4), plaçons trois autres réservoirs de même capacité, et à un moment donné, supprimons, par un moyen quelconque, les cloisons *mn*, *pq*, *rs*, de manière à établir la communication entre les

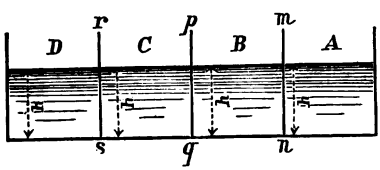

Fig. 4.

quatre réservoirs. Il est clair que nous réaliserons de ce chef un réservoir unique quatre fois plus grand que A, mais ayant la même charge d'eau *h* que A.

Supposons maintenant qu'on superpose (fig. 5) les quatre réservoirs, au lieu de les placer l'un à côté de l'autre.

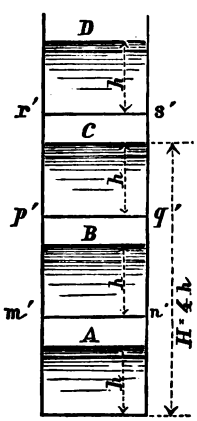

Fig. 5.

En faisant disparaître les cloisons *m'n'*, *p'q'*, *r's'*, la hauteur d'eau devient H, quatre fois plus grande que *h*, c'est-à-dire que l'on a H = 4*h*.

Le premier cas est une association en surface et le second cas une association en tension.

Il en est absolument de même en électricité.

Association en surface ou en quantité. Réunissons ensemble d'une part toutes les électrodes positives d'une série de couples primaires ou secondaires et toutes les électrodes négatives d'autre part. Il est certain que cela revient à former un élément unique dont les électrodes auront acquis de grandes dimensions. Par conséquent, la force électro-motrice de la batterie restera la même que s'il n'y avait qu'un seul élément. L'expérience prouve que la résistance intérieure diminue en raison du nombre d'éléments.

Si l'on désigne par R la résistance extérieure, par r la résistance intérieure d'un élément, et par N le nombre d'éléments, la formule de Ohm devient alors :

$$I = \frac{E}{\frac{r}{N} + R} = \frac{NE}{r + NR}.$$

Association en tension. Cette association a pour but de réunir le pôle positif d'un élément au pôle négatif de l'élément suivant, puis le pôle positif de celui-ci au pôle négatif de son voisin, et ainsi de suite.

Dans ces conditions, nous sommes censés avoir superposé les forces électro-motrices des éléments. Il s'ensuit donc que la force électro-motrice de la batterie sera égale à NE ; quant à la résistance, elle est devenue également N fois plus grande, et la formule de Ohm s'écrira :

$$I = \frac{NE}{Nr + R}.$$

Il arrivera, dans les applications, que tantôt r pourra être négligé devant R ou inversement. Dès lors, les formules que nous venons de poser se simplifieront comme suit :

r étant négligeable devant R $\left\{ \begin{array}{l} I = \frac{NE}{NR} = \frac{E}{R}; \\ I = \frac{NE}{R}. \end{array} \right.$

R étant négligeable devant r $\left\{ \begin{array}{l} I = \frac{NE}{r}; \\ I = \frac{NE}{Nr} = \frac{E}{r}. \end{array} \right.$

§ 7.

UNITÉS ÉLECTRIQUES.

Les unités électriques dont on fait généralement usage en pratique ont été élaborées par l'Association britannique et adoptées par le Congrès international des électriciens réuni à Paris en 1881.

Les unités fondamentales sur lesquelles repose le système d'unités électriques sont les suivantes :

Unité de longueur : le *centimètre.*
Unité de poids : le *gramme.*
Unité de temps : la *seconde.*

Ce système porte le nom de *système-centimètre-gramme-seconde,* désigné souvent sous le nom de *système C. G. S.*

Indiquons brièvement le nom et la valeur des unités électriques :

Unité d'intensité. — Cette unité a reçu du Congrès le nom d'*ampère*. Un courant de 1 ampère est capable de précipiter très approximativement quatre grammes d'argent par heure.

Unité de force électro-motrice. — L'unité de force électro-motrice prend le nom de *volt*. Sa valeur est égale à 0,95 environ de la force électro-motrice de l'élément Daniel.

Unité de résistance. — C'est l'*ohm* qui sert de nom à l'unité de résistance. Elle est égale à la résistance que présente, à la température de la glace fondante, une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 106 centimètres de longueur.

D'après la loi de Ohm, la formule (1) trouvée ci-dessus peut s'écrire :

$$1 \text{ ampère} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ohm}}.$$

Unité de quantité. — Elle porte le nom de *coulomb*. Un coulomb est la quantité d'électricité qui, *pendant une seconde,* traverse un circuit de 1 ohm avec une différence de potentiel de 1 volt.

Il s'ensuit donc qu'un courant d'une intensité égale à 1 ampère a un débit électrique de 1 coulomb. Par conséquent, si le courant de 1 ampère traverse le circuit pendant une heure, la quantité d'électricité débitée, pendant ce temps, vaudra 1 coul. $\times$ 3600 secondes $=$ 3600 coulombs ; c'est ce que l'on désigne sous le nom de *un ampère-heure*.

Unité de capacité. — Elle prend le nom de *farad*. C'est la capacité que possède un condensateur chargé à un potentiel de un volt et renfermant un coulomb.

Le tableau ci-dessous résume les cinq unités dont il est fait usage en électricité.

NATURE DES QUANTITÉS ÉLECTRIQUES.	NOM DE L'UNITÉ.	SYMBOLE.
Intensité	Ampère.	I.
Force électro-motrice. . . .	Volt.	E.
Résistance.	Ohm.	R.
Quantité	Coulomb.	Q.
Capacité.	Farad.	C.

Il peut se faire que les quantités à mesurer, étant trop considérables ou trop petites, exigent que l'on emploie de trop grands nombres ou de trop grandes fractions pour exprimer la valeur en unités électriques. On a donc trouvé sage d'imaginer des *multiples* et des *sous-multiples* dont voici la nomenclature :

MULTIPLES.

Déca.	10	unités.
Hecto	100	»
Kilo	1 000	»
Myria	10 000	»
Mego ou meg.	1 000 000	»

SOUS-MULTIPLES.

Déci.	1/10	d'unité.
Centi.	1/100	»
Milli.	1/1 000	»
Micro ou mic.	1/1 000 000	»

Indépendamment des unités électriques que nous avons définies, il est utile de connaître la valeur de certaines unités mécaniques dont on se sert dans l'étude des accumulateurs.

Les unités principales sont :

L'unité de travail ou d'énergie, le cheval-vapeur et le cheval-heure.

L'*unité de travail* est le kilogrammètre : c'est le travail engendré par un poids de 1 kilogramme tombant de 1 mètre de hauteur.

Le *cheval-vapeur* est l'unité de travail des machines à vapeur par unité de temps. Il est égal à 75 kilogrammètres par seconde.

Le *cheval-heure* se rapporte surtout au travail des accumulateurs.

Il vaut :

$75 \times 3\,600$ secondes $= 270\,000$ kilogrammètres.

La valeur du travail ou de l'énergie dépensée par un appareil électrique peut affecter l'une des formes suivantes :

$$W = \frac{EI}{9{,}81} \text{ kilogramm. par seconde;}$$

ou : $W = \frac{EI}{9{,}81 \times 75} = \frac{EI}{736}$ chevaux-vapeur ;

ou bien encore : $W = \frac{EI}{4{,}16}$ calories.

Enfin, la nouvelle unité proposée par Siemens en 1882, le *watt,* est l'énergie correspondant au produit de un volt par un coulomb; 1 watt $= \frac{1}{9{,}81}$ kilogrammètre.

Nous avons cru utile, en donnant cette introduction, d'entrer dans quelques détails sur les termes élémentaires que l'on rencontre à chaque instant dans l'étude de l'électricité.

Il est indispensable de se rendre un compte exact des relations que nous avons énoncées; ce n'est qu'à ce prix qu'on pourra tirer un parti utile de l'étude qui va suivre.

PREMIÈRE PARTIE.

ÉTUDE THÉORIQUE & DESCRIPTIVE

DES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE PREMIER.

COURANTS SECONDAIRES.

§ 1.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

L'étude d'une science est toujours facilitée par une classification méthodique des faits, des observations et des phénomènes qui concourent à son développement.

Ce qu'il faut toujours avoir présent à l'esprit, ce sont les principes qui forment la base des théories.

C'est par une étude attentive, raisonnée et approfondie de ces principes que l'on parvient à faire des découvertes qui agrandissent le domaine scientifique.

Dans l'état actuel de nos connaissances électriques, y a-t-il possibilité d'établir une classification des accumulateurs capable d'indiquer la voie dans laquelle doivent se diriger les recherches des savants et des inventeurs ?

Jusqu'ici il n'existe, du moins à notre connaissance, aucune classification des piles secondaires.

Cependant chaque jour voit naître un nouveau brevet pour accumulateur, et naturellement, d'après son parrain, ce nouvel accumulateur est supérieur à tout ce qui a été réalisé antérieurement.

Il n'est pas inutile de dire brièvement de quelle manière ont été entreprises les recherches que l'on a faites dans ces dernières années.

Les différents systèmes que l'on imaginait reposaient-ils sur une théorie solide et raisonnée ?

Discutait-on la valeur d'un accumulateur en partant des données de la vraie science? A ces questions nous ne pouvons malheureusement pas donner une réponse affirmative.

La science électrique a été envahie par la banque.

Il s'est fait, un beau jour, un certain bruit autour de l'accumulateur Planté modifié, quant à sa formation, par M. Faure. Certains financiers, dans un but uniquement spéculatif, avaient couvert les murs de Paris de magnifiques affiches qui eurent le don d'exercer une influence néfaste sur la masse des badauds.

A partir de ce jour, les accumulateurs furent à la mode. On en vit surgir par douzaines, la plupart soi-disant inventés (?) par des gens qui ignoraient même l'alphabet de l'électricité. Aidés de certains spéculateurs, ces inventeurs (?) parvinrent à attirer l'attention sur leur nom et à créer des sociétés qui furent loin de répondre aux vœux des souscripteurs.

On ne saurait trop regretter et déplorer en même temps une telle manière de faire.

Nous allons exposer une étude théorique des courants secondaires qui nous permettra d'établir une classification méthodique des accumulateurs, et nous indiquera en même temps la marche à suivre pour arriver pratiquement à un système aussi parfait que possible.

Nous pouvons dire dès maintenant que, dans cette voie, rien ne peut plus être dû au hasard; la théorie est suffisamment avancée pour nous faire connaître les moyens à adopter dans le but d'obtenir un accumulateur capable de rendre de vrais services dans l'industrie.

Il est indispensable, avant tout, de bien se rendre compte du sens qu'il faut attribuer à ce terme : « *Accumulateur d'électricité* ».

Nous avons vu qu'un accumulateur n'est autre chose qu'une pile primaire, lorsqu'il a subi une opération qui s'appelle *la charge*.

Un accumulateur est composé de parties solides qui sont en général des éléments métalliques et de parties liquides qui constituent des électrolytes.

Dans le voltamètre servant à la décomposition de l'eau, nous avons montré que, sous l'influence du *courant primaire*, l'eau acidulée est décomposée : l'oxygène se porte sur le fil positif et l'hydrogène se rend au fil négatif. Si l'on supprime ensuite le courant primaire, l'on a deux électrodes qui ont *emmagasiné le travail chimique*, en emprisonnant en quelque sorte les gaz,

oxygène et hydrogène ; et ces gaz sont maintenant censés *faire corps avec ces électrodes.*

Ce nouvel état chimique des électrodes résulte de l'action du courant primaire, c'est-à-dire de l'opération désignée sous le nom de *la charge.*

Ainsi donc, *charger un accumulateur*, c'est modifier l'état de ses électrodes en décomposant un électrolyte.

Lorsqu'un accumulateur est *chargé*, il possède la propriété d'engendrer une certaine quantité d'électricité ; le travail ou le fonctionnement de l'accumulateur chargé a reçu le nom de *décharge.*

Il résulte de ce qui précède que le terme « *accumulateur d'électricité* » est peu correct. Ce que l'on emmagasine, ce n'est pas de l'électricité, mais bien un travail chimique produit au moyen d'un courant électrique, et, pendant la décharge, le travail de l'accumulateur qui est également de nature chimique, donne naissance à un courant électrique.

Nous dirons ainsi qu'*un accumulateur est un appareil capable d'emmagasiner un travail électro-chimique susceptible de se transformer en travail chimico-électrique.*

Dans les systèmes d'accumulateurs que nous rencontrons dans la pratique, nous trouvons toujours des métaux classés parmi les métaux pauvres plongeant dans un électrolyte qui, tantôt, est l'eau acidulée par l'acide sulfurique, et tantôt, une dissolution saline d'un

certain métal. Jusqu'ici tous les accumulateurs sont à un seul liquide.

Pour obtenir un accumulateur aussi parfait et aussi industriel que possible, nous devons nous demander : 1° Quel est le métal dont nous devons faire choix pour les deux électrodes? 2° Quelle doit être la nature du bain à employer ?

Est-il nécessaire de dire que, pour constituer un appareil capable de rendre des services dans les applications industrielles, l'accumulateur doit être composé de substances d'un prix peu élevé ?

A priori donc, on pourrait déjà exclure les métaux nobles, tels que l'or et l'argent; à moins, toutefois, que les effets obtenus au moyen de ces métaux ne soient tellement puissants qu'ils parviennent à compenser la différence entre leur valeur vénale et celle des métaux pauvres.

Comme cette compensation est loin de se réaliser, nous croyons inutile de nous étendre sur les métaux nobles.

La charge effectue une décomposition électrolytique; mais si les produits résultant de cette décomposition sont volatils; si ces produits, sous la forme de bulles gazeuses, peuvent crever à la surface du bain; si, en d'autres termes, ils ne se combinent pas chimiquement ou ne parviennent pas à faire corps avec les électrodes, nous n'obtenons pas de courant secondaire.

Au contraire, lorsqu'il y a combinaison chimique, le

courant secondaire prend naissance et persiste aussi longtemps que les électrodes affectent un état différent.

Mais pour que l'accumulateur constitue un appareil dont la régénération du courant secondaire ait lieu indéfiniment, il est indispensable que les actions chimiques soient rigoureusement réversibles, c'est-à dire qu'après la décharge les électrodes et le liquide doivent avoir repris le même état que celui qu'ils affectaient avant la charge.

Par conséquent, pour réaliser un accumulateur d'électricité, *la nature des éléments solides et liquides entrant dans la composition de l'appareil doit être telle que, 1° après l'action de la charge, les électrodes se trouvent dans un état électro-chimique différent, et 2° qu'après la décharge les divers éléments soient ramenés à leur état primitif.*

Le voltamètre représenté figure 1, comporte deux éprouvettes qui emprisonnent les produits résultant de la décomposition électrolytique.

Nous allons maintenant supprimer ces deux éprouvettes dans toutes les expériences qui vont suivre ; nous substituerons au platine le cuivre, le zinc, le fer et le plomb, et nous étudierons les effets produits dans des voltamètres formés au moyen de ces métaux, pendant l'action du courant secondaire, c'est-à-dire pendant la décharge.

Il est évident que les voltamètres ainsi considérés sont de véritables accumulateurs électriques.

§ 2.

COURANTS SECONDAIRES PRODUITS PAR DIVERS MÉTAUX.

L'étude des courants secondaires produits par des voltamètres de divers métaux, a été faite, d'une façon absolument remarquable, par M. Planté; nous ferons usage, dans la suite de cette exposition, de certains renseignements donnés par ce savant physicien dans son excellent ouvrage : *Recherches sur l'électricité.* Le travail de Planté devrait se trouver dans la bibliothèque de tous ceux qui désirent étudier les accumulateurs électriques.

Le voltamètre qui a servi aux expériences de Planté est représenté par la fig. 6. Planté a étudié les métaux riches comme les métaux pauvres.

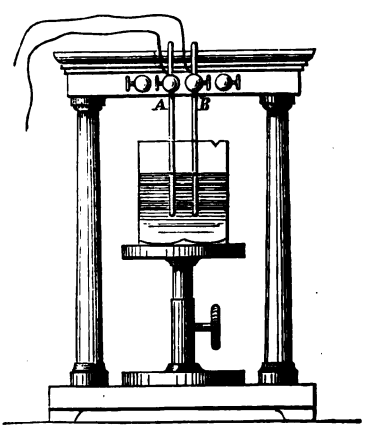

Fig. 6.

Les fils métalliques de ces métaux formant les deux électrodes étaient attachés aux bornes A et B.

« On se plaçait toujours, dit-il, dans les mêmes conditions, en employant des fils de même diamètre, plongeant de la

même quantité, également écartés, et on les soumettait pendant le même temps à l'action du courant primaire. »

En se servant de simples fils métalliques d'une faible longueur, et, par conséquent, d'une surface très minime, l'on conçoit qu'il est extrêmement difficile de contrôler les résultats, car les effets produits pendant la décharge ne durent qu'un temps excessivement limité.

En outre, depuis le jour où M. Planté a publié ses recherches, l'on a créé un système complet d'unités électriques et l'on a imaginé des appareils de mesure très précis.

Ces unités et ces appareils n'existant pas avant Planté, l'on s'explique les difficultés que devait rencontrer ce physicien pour déterminer les facteurs du courant secondaire obtenu dans ses voltamètres.

Aussi nous voyons Planté rapporter, par exemple, la force électro-motrice des divers systèmes mis en expérience, tantôt à la force électro-motrice d'un élément Daniel, tantôt à celle de la pile Bunzen, et ailleurs encore il nous dit simplement que la force électro-motrice est très faible, ou assez puissante.

Donnons quelques-uns de ses résultats.

En parlant du voltamètre à fils de cuivre, il est dit :

« Nous avons trouvé que la force électro-motrice du courant secondaire fourni par un voltamètre à fils de cuivre et à eau acidulée par l'acide sulfurique, aussitôt après la rupture du courant primaire, n'était égale qu'à environ 1/10 de celle de l'élément Daniel. »

Au sujet du voltamètre à fils d'argent, M. Planté dit

« que le courant secondaire est beaucoup plus intense qu'avec le cuivre. »

En ce qui concerne le voltamètre à fils de plomb : « Nous avons trouvé, dit-il, en opérant aussitôt après la rupture du courant primaire, que la force électromotrice était approximativement égale à 1,5, celle de l'élément de Bunsen étant prise pour unité. »

« Le courant secondaire du voltamètre à fils d'aluminium est extrêmement faible. »

Quant aux voltamètres à fils de fer et de zinc, le courant secondaire, d'après Planté, est assez énergique.

Bien que, dans l'étude que nous avons entreprise, nous nous soyons servi d'électrodes à grande surface (sauf pour le platine), nous nous plaisons à reconnaître que nous n'avons découvert aucune particularité nouvelle qui n'ait été signalée par Planté. Celui-ci cependant n'avait opéré que sur des appareils minuscules et néanmoins la concordance des résultats est absolument remarquable.

Nous pourrions nous dispenser de considérer les particularités qui concernent le voltamètre ou accumulateur au platine, ce métal rentrant dans la catégorie des métaux nobles. Si nous en donnons ici quelques détails, c'est parce que nous ne pouvons pas oublier que le premier accumulateur connu était précisément constitué par des fils de platine.

L'intérêt que l'on doit donc attacher à l'étude de ce voltamètre, est plutôt un intérêt historique que pratique et industriel.

L'étude que nous avons entreprise visait d'une façon plus spéciale les considérations capables de guider l'ingénieur dans les recherches pratiques d'un accumulateur industriel; c'est pourquoi, en rappelant les observations de Planté, nous appuyerons moins spécialement sur les faits exclusivement théoriques. Avant d'examiner les voltamètres au point de vue du courant secondaire, nous dirons, d'après M. Planté, que « l'ordre dans lequel les métaux, employés comme électrodes d'un voltamètre à eau acidulée par l'acide sulfurique, peuvent être rangés, au point de vue de l'intensité du courant secondaire observé immédiatement après la rupture du courant primaire, n'est point exactement inverse de l'ordre dans lequel ces mêmes métaux se trouvent rangés au point de vue de l'intensité du courant primaire traversant le voltamètre; ce qui aurait lieu si la tendance à la production d'un courant secondaire était la seule ou la principale cause d'affaiblissement du courant primaire. »

M. Planté en cite un exemple des plus frappants.

Le voltamètre à électrodes d'aluminium est celui qui affaiblit le plus l'intensité du courant primaire. Si donc la cause de cet affaiblissement n'était due qu'à la production du courant secondaire, l'aluminium donnerait le plus fort courant secondaire. Or, le courant secondaire produit par un voltamètre à l'aluminium est plus faible que celui de tous les autres métaux. « Cela vient de ce que d'autres causes, souvent plus influentes que le courant secondaire lui-même, telle que la formation

d'une couche d'oxyde au pôle positif, son insolubilité, son défaut de conductibilité, les gaines de liquide provenant de l'action du métal sur l'électrolyte à l'un ou l'autre pôle, etc., contribuent aussi à l'affaiblissement du courant primaire. »

VOLTAMÈTRE OU ACCUMULATEUR AU PLATINE.

Prenons le voltamètre représenté par la fig. 1, avec les éprouvettes en moins.

Lorsqu'on fait passer le courant primaire à travers le voltamètre à fils de platine sans éprouvette, il se produit immédiatement un abondant dégagement de gaz à la surface du liquide. Des bulles d'hydrogène viennent crever au-dessus de l'électrode négative et des bulles d'oxygène, moins grosses que celles d'hydrogène, au-dessus de l'électrode positive.

En examinant attentivement l'état des fils, on observe que l'aspect physique n'a pas été modifié.

Pendant l'action de l'électrolyse, l'hydrogène se combine avec le platine et semble former, comme dit Planté, une vapeur métallique.

La seconde électrode ne s'oxyde que d'une façon bien minime, mais il y a lieu de supposer, comme nous le verrons surtout en étudiant le voltamètre au plomb, qu'il se forme autour des électrodes une sorte de gaine très oxygénée d'une part, et très hydrogénée d'autre part, qui contribue, dans une certaine mesure, à la production du courant secondaire.

Si celui-ci prend naissance, c'est parce que le platine hydrogéné a une affinité assez marquée pour l'oxygène de l'eau, tandis que la deuxième électrode, légèrement oxydée pendant l'action du courant primaire, et entourée en même temps d'une gaine fortement oxygénée, a une tendance prononcée à s'emparer de l'hydrogène de l'eau.

Mais à cause de l'instabilité dans le liquide de ces produits surhydrogénés et suroxydés, ils se dissolvent rapidement et l'on s'explique que deux minutes après la charge, l'appareil ne donne plus de courant.

En résumé, les gaz qui résultent de la décomposition de l'électrolyse ne se combinent que d'une façon insensible avec les électrodes. Celles-ci ne peuvent donc pas emmagasiner une quantité suffisante du travail chimique.

Concluons donc de ce qui précède que les actions chimiques qui donnent naissance au courant secondaire n'ont pas d'effet utile suffisamment prononcé; et, par conséquent, le courant secondaire du voltamètre au platine n'a qu'une très faible durée. Le platine ne convient donc pas pour réaliser un accumulateur industriel.

Si nous plongeons un troisième fil de platine dans le liquide et si nous l'associons avec le fil positif, nous trouvons aussitôt après la rupture une force électromotrice inférieure à celle que nous obtenons quand ce troisième fil est associé avec le fil négatif.

Il s'ensuit donc que la force électro-motrice du courant résulte bien plus de l'électrode négative que de l'électrode positive.

Cette conclusion montre donc que la force électromotrice de ce voltamètre dépend surtout de l'activité d'oxydation du platine hydrogéné pendant la charge; le fait de la réduction du platine oxydé sous l'action primaire n'intervient que plus faiblement.

VOLTAMÈTRE OU ACCUMULATEUR AU CUIVRE.

Faisons passer un courant primaire à travers un accumulateur dont les électrodes sont deux plaques en cuivre plongeant dans un bain d'eau acidulé par l'acide sulfurique au dixième. On observe immédiatement que la plaque positive se recouvre d'un dépôt noirâtre, tandis que la plaque négative conserve sa couleur primitive.

Mais à peine ce dépôt noirâtre a-t-il envahi toute la plaque que des filets bleuâtres semblent s'en détacher pour gagner d'abord le fond du vase et se diriger ensuite vers l'électrode négative.

Lorsque l'écoulement des filets bleuâtres commence, l'on s'aperçoit que la teinte du dépôt devient beaucoup plus claire.

Donnons l'explication de ces divers phénomènes.

Sous l'action du courant primaire, l'eau se décompose en gaz oxygène et en gaz hydrogène.

L'hydrogène se porte sur la lame négative, et, comme ce gaz n'a pas d'action chimique sensible sur le cuivre, il se dégage à la surface du bain sous la forme de bulles.

L'expérience montre, en effet, que pendant la première phase du phénomène, il se produit au-dessus de l'électrode négative un dégagement de gaz assez abondant.

Quant à l'oxygène, il se rend à l'électrode positive avec laquelle il se combine pour former de l'oxyde de cuivre. Mais celui-ci est soluble dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique, et, en se dissolvant, il engendre du sulfate de cuivre de couleur bleuâtre; c'est précisément alors qu'apparaissent les filets de teinte bleue dont nous avons parlé. Or, l'écoulement du sulfate rend l'électrode positive rebelle à se recouvrir encore d'oxyde de cuivre. Ce dernier se combine presque au fur et à mesure qu'il se forme avec le liquide pour engendrer du sulfate, et c'est ainsi que cette lame passe du noir à une teinte à peine ternie.

A partir de cet instant la nature chimique du bain se modifie.

Jusqu'à ce moment nous avions en effet de l'eau mélangée à un dixième d'acide sulfurique, mais lorsque la teinte bleue apparaît dans le liquide, il est clair que celui-ci est constitué par du sulfate de cuivre en dissolution. Aussi les réactions chimiques ne sont-elles plus les mêmes que tantôt.

L'action du courant primaire a pour effet de décomposer non seulement l'eau du bain, mais encore le sulfate de cuivre au fur et à mesure de sa formation.

Plaçons-nous au moment où une certaine quantité de sulfate de cuivre $CuSO^4$ est en dissolution dans le liquide.

Nous avons alors le diagramme suivant :

ÉLECTRODE + ÉLECTRODE −

$$Cu \mid SO^4Cu \mid SO^4Cu \mid \ldots\ldots\ldots \mid SO^4Cu \mid Cu.$$

Pendant la charge, les combinaisons se font de la manière indiquée par les traits ci-dessous :

$$\underbrace{CuSO^4} \quad \underbrace{Cu \mid SO^4}\underbrace{Cu \mid} \ldots\ldots \mid \underbrace{SO^4} \quad \underbrace{Cu \mid Cu}.$$

c'est-à-dire que SO^4 se combine avec Cu de l'électrode positive et engendre du sulfate de cuivre qui remplace, dans la dissolution, le sulfate de cuivre lui-même que la décomposition fait disparaître. L'électrode négative, d'autre part, se recouvre de cuivre Cu et ces phénomènes se reproduisent aussi longtemps qu'il reste du métal à l'électrode positive.

En résumé, si le courant primaire agit pendant une longue durée, presque tout le métal de la plaque positive se rend, sous l'influence du courant primaire, sur l'électrode négative.

Au contraire, si la charge ne s'effectue que pendant un temps relativement restreint, on obtient sur l'électrode positive une pellicule très mince d'oxyde de cuivre, tandis que l'électrode négative ne subit guère d'action chimique sensible.

Supposons que, dans ce dernier cas, on décharge le voltamètre ainsi chargé. La lame oxydée pendant la charge va se réduire pendant la décharge et l'autre

lame s'oxydera. A cause de sa nature soluble, l'oxyde de cuivre formé sur la plaque positive ne peut acquérir qu'une épaisseur extrêmement réduite; car sous l'action du courant primaire, cet oxyde de cuivre atteint bien vite la période de dissolution pour engendrer du sulfate.

Le courant secondaire qui prend naissance dans le voltamètre au cuivre dépend, d'une part, de l'activité de réduction de la lame qui a été oxydée pendant la charge. Il y a lieu, d'autre part, de tenir compte de l'énergie d'oxydation de l'autre lame; et l'expérience le prouve d'autant mieux que si le courant primaire agit pendant un temps suffisant pour produire du sulfate de cuivre, décomposer celui-ci et effectuer un dépôt de métal sur l'électrode négative, on obtient alors un courant secondaire plus intense. Ce fait résulte évidemment de la facilité avec laquelle le dépôt de cuivre réduit, pulvérulent, produit sur la lame négative sous l'action de la charge, peut s'emparer de l'oxygène du liquide.

Concluons de ce qui précède que le courant primaire n'agit utilement dans un accumulateur au cuivre, que pendant les premiers instants de la charge, à cause de la nature soluble de l'oxyde de cuivre, et la quantité de travail chimique emmagasinée est trop faible pour qu'un tel accumulateur puisse servir dans l'industrie.

Le fait capital à retenir, c'est que l'oxyde de cuivre qui se forme dans un tel voltamètre se dissout avec une très grande rapidité.

En mesurant, au moyen d'un voltamètre, la force électro-motrice d'un accumulateur à base de cuivre et

à eau acidulée par l'acide sulfurique, nous avons trouvé qu'elle est égale à $0^{volt},1$ immédiatement après la rupture du courant primaire.

VOLTAMÈTRE OU ACCUMULATEUR AU PLOMB.

Lorsque nous prenons deux lames de plomb neuves, leur exposition à l'air suffit simplement pour les recouvrir d'une pellicule excessivement mince d'oxyde plombique. La couleur du plomb métallique est d'un grand brillant; on peut s'en faire une idée en coupant, au moyen d'un canif, un morceau de plomb en saumon ou en feuille laminée; mais cette couleur brillante disparaît rapidement si on laisse le métal exposé à l'air atmosphérique. Il se ternit bien vite par suite de la production de l'oxyde qui apparaît à la surface. C'est ainsi que lorsqu'on parle de deux lames de plomb neuves, il faut toujours les considérer comme étant enduites d'une couche d'oxyde dont l'épaisseur est d'une minceur extrême.

Faisons plonger deux semblables lames de plomb dans un bain d'eau acidulé par l'acide sulfurique : nous réalisons de cette manière un accumulateur à base de plomb que nous allons soumettre à l'action du courant primaire.

Pendant les premiers instants de la charge, il ne se produit pas le moindre dégagement de gaz à la surface du liquide; on constate seulement que l'électrode positive

se recouvre d'un voile brun, tandis que l'autre électrode gagne une couleur gris blanc.

Après quelques instants de chargement, des bulles de gaz viennent crever à la partie supérieure du liquide, et l'on a beau prolonger la durée du chargement, la production des bulles gazeuses persiste, ce qui prouve que le travail du courant primaire n'effectue plus de décomposition utile. Quelle est l'explication de ces diverses particularités ?

Sous l'effet de l'électrolyse, l'oxygène se porte, comme antérieurement, à l'électrode positive où il forme, par une combinaison chimique, un dépôt de peroxyde de plomb, PbO^2; c'est le voile brun que nous avons signalé.

L'hydrogène, de son côté, se porte à l'électrode négative, où il réduit la très mince pellicule d'oxyde plombique qui résulte de l'exposition du métal à l'air avant d'être placé dans le liquide.

Lorsque ces actions oxydantes et réductrices se sont produites, les dégagements de gaz commencent; l'oxygène au-dessus de l'électrode positive et l'hydrogène au-dessus de l'électrode négative.

Il est inutile de prolonger alors le chargement du voltamètre ou accumulateur; le métal sous-jacent aux couches oxydées et réduites est extrêmement rebelle à se laisser attaquer très profondément.

Après un certain temps de charge, nous avons donc deux électrodes métalliques qui affectent un état électro-chimique différent : l'une d'elles est recouverte de

peroxyde de plomb, PbO^2, et la deuxième de plomb réduit pulvérulent, Pb.

Supprimons le courant primaire et fermons le circuit de l'accumulateur chargé. Le peroxyde de plomb a une tendance très prononcée à décomposer l'eau, et comme il possède une puissante affinité pour l'hydrogène, il est évident qu'il s'emparera de ce gaz avec une grande rapidité, pour former de l'eau, H^2O.

Quand l'accumulateur chargé travaille, la lame peroxydée sous l'action du courant primaire passe ainsi à un degré d'oxydation moindre, PbO. Mais l'électrode qui avait été réduite pendant la charge s'oxyde à son tour, grâce à l'affinité que possède pour l'oxygène le plomb pulvérulent. Il s'ensuit qu'après la décharge les deux lames sont recouvertes d'oxyde plombique.

En résumé, l'énergie du courant secondaire provient, dans l'accumulateur au plomb, des actions simultanées de réduction de la couche spongieuse de peroxyde formée sur l'électrode positive sous l'action du courant primaire et d'oxydation de la couche réduite produite sur l'électrode négative. Mais n'oublions pas que l'expérience prouve que les actions réductrices sont beaucoup plus énergiques que les actions oxydantes.

On observe dans l'étude de l'accumulateur au plomb certains phénomènes qu'il est utile de connaître.

Quand un accumulateur à lames de plomb n'a fonctionné que pendant quelques semaines, on trouve que sa force électro-motrice mesurée immédiatement après la rupture du courant primaire, est supérieure à deux

volts. Mesurée quelques minutes après la rupture, cette force électro-motrice descend à $1^{volt},5$.

La baisse si considérable de la force électro-motrice ne peut guère s'expliquer que de la manière suivante : autour des électrodes, il doit se former des composés fortement oxygénés et hydrogénés qui contribuent, dans une certaine mesure, à la production du courant secondaire. Ces composés sont essentiellement instables et disparaissent rapidement au sein du liquide.

L'accumulateur au plomb possède l'immense avantage de conserver sa charge pendant une très grande durée. On peut laisser reposer l'appareil pendant plusieurs heures et même pendant plusieurs jours; on observe que le travail électro-chimique reste emmagasiné en grande partie d'une façon remarquable. Ce fait provient de l'*insolubilité de l'oxyde plombique.*

L'expérience montre (nous reviendrons ultérieurement sur cette particularité) que plus un accumulateur a subi les opérations de la charge et de la décharge, plus est longue aussi la durée du courant secondaire. En outre, la valeur de la force électro-motrice normale de $1^{volt},5$ augmente également, de telle sorte que lorsque l'accumulateur est *formé,* cette valeur peut atteindre $2^{volts},15$.

VOLTAMÈTRE OU ACCUMULATEUR AU ZINC.

Lorsque les électrodes d'un voltamètre ou accumulateur sont deux plaques de zinc plongeant dans un bain d'eau acidulé par l'acide sulfurique, il se présente une particularité que nous ne rencontrons dans aucun des accumulateurs examinés précédemment.

Il est inutile de faire passer un courant primaire à travers un tel voltamètre pour observer la production d'un courant électrique. En effet, le zinc est un métal qui se laisse attaquer, d'une façon très sensible, par l'eau acidulée; il suffit ainsi que l'une des plaques soit moins attaquée que sa voisine pour obtenir un courant assez fort. Il y a lieu de remarquer que le sens du courant change à chaque instant avec la marche de l'attaque du métal pour chaque électrode. On ne peut guère songer à donner une valeur normale à la force électromotrice, attendu que celle-ci dépend de l'énergie de l'attaque et du sens du courant qui sont essentiellement variables.

Mais, comme le dit très bien M. Planté, il y a toutefois un moyen d'observation qu'on peut employer pour que les effets soient aussi peu troublés que possible par le courant propre du voltamètre, c'est de ne point plonger à l'avance les électrodes dans le liquide et de disposer les communications de telle sorte que le circuit se ferme par l'immersion des électrodes dans l'eau acidulée.

Il se passe alors une décomposition chimique analogue à celle que nous avons montrée dans l'accumulateur au cuivre et que nous indiquerons par le diagramme ci-dessous :

ÉLECTRODE +　　　　　　　　　　ÉLECTRODE —

$$\underbrace{ZnSO^4}\ \underbrace{Zn \mid SO^4}\ \underbrace{Zn \mid .\ .\ .\ .\ .\ \mid SO^4}\ \underbrace{Zn \mid Zn},$$

c'est-à-dire que SO^4 de l'acide sulfurique, en se combinant avec le métal de l'électrode positive, régénère le sulfate de zinc qui se décompose et que *Zn* se dépose sur l'électrode négative. En d'autres termes, il y a une dissolution, une attaque du métal d'une électrode au profit de la deuxième électrode.

Mais si on laissait les plaques dans le liquide, comme le zinc se dissout dans l'eau acidulée sulfurique, on conçoit que l'électrode négative, au bout de quelque temps, aurait subi le même sort que sa voisine.

Ce qu'il faut retenir de l'accumulateur au zinc, c'est que l'oxyde de zinc qui se produit est essentiellement soluble et que le zinc a une tendance très accentuée à décomposer l'eau en s'emparant de l'oxygène.

VOLTAMÈTRE OU ACCUMULATEUR AU FER.

Tout ce que nous venons de dire concernant l'accumulateur au zinc est également applicable à l'accumulateur au fer. En effet, le fer s'altère rapidement dans l'eau acidulée sulfurique, absolument comme le zinc.

Seulement la tendance à s'emparer de l'oxygène, par la décomposition de l'eau acidulée, est moins énergique que celle du zinc ; c'est pourquoi la force électromotrice d'un tel voltamètre est également moindre.

CONCLUSIONS.

De l'examen qui précède, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

1° Le plomb est le seul des métaux considérés qui donne sous l'action de la charge et de la décharge un oxyde insoluble dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique.

2° La force électro-motrice du courant secondaire dépend *surtout,* dans les voltamètres ou accumulateurs au platine, au cuivre, au zinc et au fer, de l'activité d'oxydation de la couche spongieuse formée sur l'électrode négative pendant la charge. Au contraire, dans l'accumulateur au plomb, la force électro-motrice dépend *surtout* de l'énergie de réduction de la couche d'oxyde formée sur l'électrode positive sous l'action du courant primaire.

La première conclusion nous permet d'étudier le phénomène de la *polarisation des accumulateurs*, question des plus importantes, et sur laquelle repose la *classification des accumulateurs* que nous avons adoptée.

Quant à la deuxième conclusion, nous verrons qu'elle permet de nous indiquer le moyen de *réaliser l'accumulateur possédant la force électro-motrice maxima.*

§ 3.

POLARISATION DES ACCUMULATEURS.

Dans son *Traité de la pile électrique,* M. Niaudet explique, d'une façon claire et précise, le phénomène de la polarisation des batteries voltaïques. Résumons, aussi brièvement que possible, son étude de la polarisation d'un couple de Volta.

Prenons une pile de Volta et fermons le circuit sur un galvanomètre; on voit l'intensité du courant diminuer depuis le moment où le circuit est fermé, et cette diminution est d'autant plus rapide que la résistance extérieure est plus faible. Dans le cas où le circuit est très résistant, s'il s'agit, par exemple, d'une ligne télégraphique de grande longueur, l'affaiblissement du courant est lent et presque insensible.

Si l'on examine attentivement ce qui se passe lorsque la pile de Volta travaille en court circuit, on constate que des bulles d'hydrogène se déposent sur l'électrode cuivre (pôle positif), et l'on est amené à croire, dit Niaudet, que ces bulles imperceptibles se forment sur toute la surface, de telle sorte qu'une couche gazeuse s'interpose d'une manière plus ou moins complète entre l'électrode et le liquide.

Ce qui confirme cette opinion, c'est que le courant électrique reprend son intensité normale, lorsqu'on agite l'électrode cuivre de manière à faire disparaître les bulles de gaz, ou si on frotte le cuivre avec un

pinceau pour en balayer la surface. D'autre part, l'agitation de l'électrode zinc ne modifie pas la marche décroissante du courant.

Par conséquent, le phénomène qui se passe à la surface de l'électrode cuivre est bien la cause de la diminution d'intensité du courant électrique; c'est ce phénomène que l'on désigne sous le nom de *polarisation des piles primaires.*

Nous allons examiner si la polarisation des accumulateurs a la même origine. Notre étude se portera sur les accumulateurs à base de plomb, qui sont les plus employés dans la pratique.

Lorsqu'on décharge un accumulateur à base de plomb sur un circuit peu résistant, on observe, absolument comme dans la pile primaire, une diminution rapide de l'intensité du courant.

Si la polarisation des accumulateurs avait la même cause que la polarisation des piles primaires, on devrait obtenir un dépôt d'hydrogène sur l'électrode positive qui a subi la péroxydation pendant la charge; c'est, en effet, cette électrode qui correspond à l'élément cuivre de la pile de Volta.

Il semble donc que l'agitation de cette électrode doive faire disparaître la couche gazeuse si celle-ci existe réellement. La polarisation de l'accumulateur cesserait donc et il y aurait une reprise de l'intensité du courant.

Or, il n'en est pas ainsi, et l'on a beau agiter l'électrode péroxydée ou la frotter avec un pinceau, la polarisation persiste.

La conclusion à tirer de ces faits, c'est qu'il faut chercher, pour la polarisation des accumulateurs, une autre cause que la production d'un dépôt d'hydrogène sur la lame qui constitue le pôle positif.

Remontons à la formule générale de Ohm :

$$I = \frac{E}{R}.$$

Nous avons vu que, par suite de la polarisation, l'intensité du courant électrique I s'affaiblit rapidement. Cette diminution d'intensité peut provenir de deux causes : ou bien de la diminution de la force électro-motrice E, ou de l'augmentation de la résistance intérieure de l'accumulateur R.

La résistance augmente-t-elle ?

A première vue on est porté à répondre négativement et voici pourquoi : la loi générale relative à la résistance intérieure des piles peut se définir comme suit : *la résistance est d'autant plus faible que la distance des électrodes dans le liquide est plus petite et que les surfaces plongées sont plus grandes.*

Dans le cas qui nous occupe, la distance des électrodes reste évidemment la même pendant tout le temps de l'expérience ; ensuite, quant à la diminution de surface, on pourrait admettre que cette diminution se produit réellement si une couche de gaz hydrogène se déposait partiellement, puis complètement, à la surface de l'électrode peroxydée. On a vu que ce dépôt gazeux ne se produit pas ; par conséquent, il n'y a pas lieu de tenir compte, au premier abord, de la résistance

R dans l'affaiblissement de l'intensité du courant I. Comme il ne reste plus en jeu que la force électro-motrice E, demandons-nous de quelle manière E peut intervenir, pour diminuer I.

Lorsqu'un accumulateur à base de plomb est chargé, il renferme deux électrodes dont l'une est peroxydée et dont l'autre est recouverte de métal spongieux ou réduit.

Si la lame peroxydée pouvait intervenir dans la production de la polarisation, cela ne pourrait être que par la présence d'un dépôt d'hydrogène, dépôt que l'expérience ne dévoile pas.

C'est donc sur l'autre électrode que notre attention doit se porter. Admettons que l'accumulateur sur lequel nous raisonnons soit parfaitement *formé* et chargé, ce qui revient à dire que les épaisseurs des dépôts de peroxyde et de plomb réduit sont relativement fortes.

Effectuons la décharge *sur un court circuit* peu résistant, un fil de cuivre de 2 à 3 $^{m}/_{m}$ de diamètre, par exemple. L'intensité initiale du courant sera considérable ; mais ce courant électrique ne pourra rester constant que si les réactions chimiques qui s'accomplissent au sein de l'accumulateur ne modifient pas la nature et l'état des éléments qui sont la cause du courant électrique.

On sait que le peroxyde de plomb associé à du plomb réduit a une tendance très prononcée à décomposer l'eau. En fermant le circuit secondaire, cette décomposition se produit à l'intérieur du couple. Le peroxyde

de plomb qui a une très grande affinité pour l'hydrogène, doit s'en emparer rapidement pour engendrer un courant électrique aussi intense que celui que l'observation constate. Le dégagement d'électricité correspond au travail chimique qui prend naissance par suite de la production des gaz hydrogène et oxygène qui résultent de la décomposition de l'eau. Or, ce dégagement d'électricité étant considérable, la décomposition de l'eau suit la même loi. Tandis que la plaque peroxydée s'empare de l'hydrogène, la lame réduite par la charge s'oxyde, et si, par suite de la grande rapidité de décharge, *l'oxygène n'a pas le temps de pénétrer à l'intérieur de la couche de métal pulvérulent,* il se forme à la surface de cette couche réduite une mince pellicule d'oxyde de plomb. La lame négative se trouve donc dans l'état suivant :

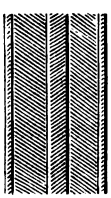

Fig. 7.

A représente le support métallique ;
B une couche de métal réduit, et
C un voile d'oxyde de plomb.

Quant à l'autre lame, comme la couche de peroxyde qui la recouvre est relativement épaisse, il s'ensuit que toute cette couche n'a pas eu le temps de se réduire et qu'il en reste encore une certaine épaisseur à l'état de peroxyde de plomb.

La réduction n'a eu d'autre effet que *de réduire à un degré d'oxydation moindre la surface de la couche peroxydée* qui recouvrait cette électrode.

En résumé, les surfaces extérieures des 2 électrodes

sont recouvertes d'oxyde de plomb et se trouvent ainsi dans le même état électro-chimique.

Nous avons reconnu maintes fois que l'expérience confirmait absolument cette manière de voir.

En déchargeant un accumulateur à base de plomb sur un court circuit, la teinte gris-blanc du plomb réduit ne tarde pas à se ternir et à se foncer.

Qu'on enlève celle-ci du liquide immédiatement après cette décharge et qu'on gratte délicatement la pellicule foncée, on retrouve, sous cette pellicule, la teinte gris-clair du plomb métallique. Cette pellicule est évidemment très mince en comparaison de la couche péroxydée qui est formée sur l'autre électrode ; mais il n'en est pas moins vrai que, par suite de la décharge en court circuit, les surfaces extérieures des deux électrodes de l'accumulateur se trouvent sensiblement dans le même état chimique.

Toute réaction cesse donc entre les deux plaques, et de même que deux lames d'un métal quelconque dont les surfaces se trouvent dans le même état électro-chimique, ne peuvent engendrer un courant électrique, de même ici les électrodes de l'accumulateur se trouvant toutes deux recouvertes d'une couche d'oxyde plombique ne pourront plus donner naissance au moindre courant.

En résumé, la diminution de la force électro-motrice E provient de ce que, lors d'une décharge en court circuit, les surfaces des électrodes tendent à affecter rapidement le même état électro-chimique, et nous

croyons pouvoir dire que la cause de la polarisation des accumulateurs à base de plomb, réside dans la production d'une légère pellicule d'oxyde recouvrant la surface de l'électrode réduite.

Si la décharge se fait, au contraire, sur un circuit résistant, la décomposition de l'eau a lieu lentement; le travail des réactions chimiques s'effectue conséquemment avec lenteur; le conducteur ne ramène pas l'onde électrique à son point de départ, suffisamment vite pour empêcher l'oxygène de pénétrer à l'intérieur de la couche de métal spongieux et divisé. Il n'y a plus ici formation de la pellicule d'oxyde à la surface de la couche réduite, car l'oxygène peut exercer à travers la masse toute entière son action d'une façon progressive.

Quant à la reprise du courant électrique que l'on observe lorsqu'on a laissé reposer l'accumulateur, M. Planté l'a fort bien expliqué en disant que l'oxyde de plomb se *réduit spontanément* dans l'eau acidulée, cette réduction étant d'autant plus rapide que la couche d'oxyde est plus mince.

Les considérations qui précèdent permettent de guider l'électricien dans la voie à suivre pour réduire, autant que possible, la polarisation des accumulateurs.

En effet, si la pellicule d'oxyde de plomb dont il a été question ci-dessus pouvait disparaître au fur et à mesure de sa formation, il est clair que la polarisation serait insensible et que l'accumulateur débiterait, d'une façon continue, le travail électro-chimique qu'il aurait

emmagasiné pendant la charge. Mais cette pellicule reste adhérente à l'électrode, parce que *l'oxyde de plomb est insoluble dans l'eau acidulée.*

Tout le mal provient donc de l'insolubilité de l'oxyde de plomb.

La première conclusion que nous avons tirée de l'étude des courants secondaires indique que le plomb est le seul des métaux que nous avons considérés qui donne un oxyde insoluble. Supposons qu'au lieu d'employer du plomb pour l'électrode négative, on se serve du cuivre ou du zinc ou du fer, et que le bain soit une dissolution saline de l'un de ces trois métaux dont on fera choix.

Sous l'action du courant primaire, le bain se décompose; l'oxygène peroxyde le plomb formant l'électrode positive, et le métal provenant de la décomposition de la dissolution saline se porte sur l'électrode négative.

Pendant la décharge, le plomb peroxydé se réduit à un degré moindre d'oxydation et le métal choisi pour l'électrode négative s'oxyde. Comme cet oxyde *est soluble,* il disparaît au fur et à mesure qu'il se produit. Nous avons ainsi pendant la presque totalité de la décharge un débit constant, puisque les électrodes conservent sensiblement le même état électro-chimique.

Il résulte, par conséquent, de ce qui précède que, par une certaine combinaison de métaux choisis pour les électrodes, nous pouvons diminuer dans une grande proportion la polarisation que l'on observe dans l'étude des accumulateurs à base de plomb.

CLASSIFICATION DES ACCUMULATEURS.

Le phénomène de la polarisation nous permet de donner une classification méthodique des accumulateurs électriques.

Nous les diviserons en deux classes : la première comprendra les accumulateurs polarisables, et la deuxième les accumulateurs où la polarisation, sans être nulle, peut être négligée.

Nous ferons remarquer que cette classification suit à très peu près l'ordre chronologique, et cependant, chose bizarre, l'on ne s'est pour ainsi dire pas occupé jusqu'ici des particularités relatives à la polarisation de ces appareils.

La première classe des accumulateurs comprendra les *accumulateurs à base de plomb* et se subdivisera en 2 sections, suivant que la couche de matière active (peroxyde de plomb et plomb réduit) aura été obtenue par un *dépôt naturel* ou par un *dépôt artificiel.*

A la première section se rapportent l'accumulateur Planté et tous ses dérivés; dans la deuxième section nous trouvons les accumulateurs Faure, Sellon, Volkmar, et les accumulateurs à plaques agglomérées que nous avons imaginés.

La deuxième classe comporte les accumulateurs à décompositions salines des systèmes Houston et Thomson, d'Arsonval, Sutton, Arnould et Tamine, et Reynier.

§ 4.

RECHERCHE DE L'ACCUMULATEUR POSSÉDANT LA FORCE ÉLECTRO-MOTRICE MAXIMA.

Dans l'*Introduction,* nous avons vu qu'un accumulateur industriel considéré au point de vue de sa force électro-motrice, doit réaliser les deux conditions suivantes :

1° La force électro-motrice doit être la plus grande possible ;

2° Elle doit rester constante, quelle que soit l'intensité du courant de débit.

La deuxième conclusion que nous avons tirée de l'étude des courants secondaires, nous a montré que la force électro-motrice d'un accumulateur chargé dépendait, surtout avec certains métaux, de l'énergie d'oxydation de l'une des électrodes, tandis qu'avec d'autres métaux, c'était le degré d'activité de réduction de l'autre électrode qui jouait le rôle prépondérant.

Parmi les voltamètres ou accumulateurs que nous avons considérés ci-dessus , nous avons trouvé que c'était l'accumulateur au plomb qui possédait la plus grande force électro-motrice. Dans cet accumulateur au plomb la grandeur de la force électro-motrice dépend surtout de l'affinité du peroxyde de plomb pour l'hydrogène du liquide ; en d'autres termes, c'est l'activité de

réduction de l'électrode positive qui intervient en grande partie pour donner une force électro-motrice considérable à l'appareil.

Mais, d'autre part, l'accumulateur à base de plomb n'est pas exempt d'un défaut qui a une certaine importance : nous voulons parler de la *polarisation* que nous avons étudiée dans le chapitre précédent.

Demandons-nous, comme nous l'avons fait à l'article de la *polarisation,* si, par une certaine combinaison de métaux et de liquides, il n'est pas possible de réaliser un accumulateur industriel possédant une force électro-motrice supérieure à celle de l'accumulateur au plomb.

Puisque la force électro-motrice dépend de l'énergie de réduction d'une électrode combinée avec l'activité d'oxydation de l'autre électrode, n'est-il pas évident que si nous prenons, pour l'électrode positive, le métal qui a la plus grande affinité pour l'hydrogène ou le métal de la dissolution saline qui constituera le bain, et, pour l'électrode négative, le métal qui a la plus grande affinité pour l'oxygène, n'est-il pas évident que nous réaliserons de cette manière l'accumulateur possédant la plus grande force électro-motrice qu'il soit possible d'obtenir ? Soumettons cette déduction théorique à l'expérience et choisissons, par conséquent, les métaux susceptibles de satisfaire aux conditions que nous venons d'énoncer.

L'étude des courants primaires et secondaires nous autorise à dire que le plomb est le métal qui convient le mieux pour l'électrode positive. En effet, celle-ci est

recouverte après avoir subi l'opération de la charge, d'une couche de peroxyde de plomb qui, de tous les éléments connus, possède, par la décomposition de l'eau, la plus grande affinité pour l'hydrogène.

Quant à l'électrode négative, quel est le métal dont nous devons faire choix ?

Nous avons vu qu'avec le platine, le cuivre, le zinc et le fer, la force électro-motrice du courant secondaire dépend surtout de l'activité d'oxydation du dépôt spongieux formé sur l'électrode négative pendant la charge. Or, celui de ces trois métaux donnant cette action maxima est le zinc. Choisissons donc le zinc pour l'électrode négative.

En ce qui concerne le liquide, celui-ci doit être tel qu'après la décharge, il soit revenu au même état qu'avant la charge ; or, l'expérience prouve qu'une dissolution de sulfate de zinc additionnée d'acide sulfurique répond à cette condition.

Déterminons donc la force électro-motrice d'un accumulateur dont les deux électrodes sont l'une en plomb et l'autre en zinc, ces deux électrodes plongeant dans une dissolution de sulfate de zinc acidulé. L'on trouve, alors même qu'on a laissé l'appareil au repos pendant quelques instants après la rupture du courant primaire, une force électro-motrice de $2^{\text{volts}},35$, chiffre supérieur à celui de la force électro-motrice de l'accumulateur à base de plomb seul. On voit donc que l'expérience confirme la théorie. De plus, comme l'oxyde de zinc qui se forme pendant la décharge est soluble dans le liquide,

il s'ensuit que la polarisation est très faible. Par conséquent, un tel accumulateur remplit au maximum les deux conditions que doit réaliser la force électro-motrice d'un accumulateur industriel.

Malheureusement il existe un tel inconvénient inhérent à cet accumulateur, que celui-ci ne peut être employé dans un grand nombre d'applications.

Cet inconvénient résulte de l'altération sensible et rapide que subit le zinc dans l'eau ou une solution acidulée par l'acide sulfurique. Si l'accumulateur dépense quand le circuit est ouvert, c'est-à-dire quand il ne doit pas travailler, il pourra se faire que, au moment où on devra se servir du travail de l'appareil, celui-ci aura épuisé tout ou une partie importante de la quantité emmagasinée. Je n'hésite donc pas à dire que, dans les applications industrielles, il faut écarter tous les accumulateurs qui dépensent à circuit ouvert. Un accumulateur ne peut être réellement pratique que si la dépense des électrodes ne se produit que pendant le travail qu'on lui demande. C'est ainsi que le fer qui, de tous les métaux connus, est certainement le moins coûteux, doit également être écarté. Et cependant le fer possède, comme le zinc, la faculté de donner un oxyde soluble qui donne une polarisation peu sensible.

De La Rive avait trouvé que si, parmi les trois métaux ci-dessous, l'on en prend deux pour les électrodes d'une pile primaire à eau acidulée par l'acide sulfurique, le métal oxydé, par conséquent l'électrode

négative de la pile, était toujours celui placé le plus près de la fin :

Cuivre ;
Plomb ;
Zinc.

Nous avons constitué des accumulateurs de la manière suivante : l'électrode positive de l'élément était en plomb et l'électrode négative était successivement en cuivre, en plomb et en zinc ; le bain était une dissolution du sulfate du métal employé, sauf pour le plomb ; on avait alors l'eau acidulée sulfurique. Dans ces conditions, nous avons trouvé que la force électro-motrice était :

P*b* — Cuivre.	1,3.
P*b* — P*b*.	2,15.
P*b* — Zinc.	2,35.

Si nous prenons, dans la valeur de la force électro-motrice, la part qui revient, pour chacun des systèmes à l'énergie de réduction, on voit que cette part est la même pour les quatre systèmes, puisque l'électrode positive est la même, P*b*. Les différences entre les valeurs ci-dessus ne peuvent donc provenir que de la différence entre l'activité d'oxydation des électrodes négatives. A ce point de vue donc, en considérant les chiffres trouvés pour la force électro-motrice, on reconnaît que les métaux doivent être classés dans l'ordre suivant : cuivre, plomb, zinc, c'est-à-dire que le degré d'oxydation dans les accumulateurs suit le même ordre que dans les piles primaires.

Il est nécessaire de bien comprendre la conclusion à laquelle nous sommes arrivés en recherchant l'accumulateur capable de donner la force électro-motrice maxima.

Nous n'avons envisagé que qnelques métaux, écartant tout d'abord, et, pensons-nous, avec raison, les métaux nobles, attendu que la présente étude a surtout pour but de rechercher un *accumulateur industriel.*

Il est possible que l'on parvienne à découvrir le moyen d'utiliser, comme électrodes négatives, des métaux ou des métalloïdes dont l'énergie d'oxydation soit supérieure à celle du zinc.

Nous ne pouvons devancer l'avenir, mais ce qu'il nous est permis d'affirmer, c'est que, dans l'état actuel de nos connaissances et en se servant des métaux ordinaires, la théorie montre d'une façon remarquable que l'accumulateur P*b* — *Zn* doit donner la force électromotrice maxima : l'expérience sanctionne cette déduction théorique.

§ 5.

CONDITIONS THÉORIQUES ET PRATIQUES D'UN ACCUMULATEUR PARFAIT.

1° La première condition à laquelle doit satisfaire un accumulateur industriel, c'est que les substances entrant dans sa composition soient d'un prix peu élevé.

2° L'accumulateur doit avoir une longue durée; il est indispensable que les opérations successives de la charge et de la décharge n'altèrent pas, d'une manière sensible et rapide, les électrodes de l'appareil, ni ses accessoires.

3° Son entretien doit être facile ; les agencements physiques doivent permettre de surveiller aisément les parties intérieures et le liquide.

4° La formation de l'accumulateur doit être rapide.

5° Il faut que le travail résultant de la charge se conserve longtemps et sans perte.

6° Les actions chimiques doivent toujours être proportionnelles au débit.

7° Il est nécessaire que le rendement, en travail, soit le plus élevé possible.

8° La capacité d'emmagasinement doit être la plus grande possible pour un poids donné d'électrodes.

Nous verrons ultérieurement dans quelle mesure les accumulateurs actuellement existants satisfont à ces conditions.

CHAPITRE II.

DESCRIPTION DES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

Avant de donner la description des appareils connus connus sous le nom d'*accumulateurs électriques,* nous croyons devoir dire que l'idée première, le principe des accumulateurs, date du commencement de ce siècle.

C'est un physicien français, Gautherot, qui reconnut le premier, en 1801, que des fils de platine qui avaient servi à décomposer l'eau salée par la pile, avaient la propriété de donner un courant électrique de très courte durée, lorsqu'on les détachait de la pile elle-même.

Ritter fit la même observation, en 1803, sur une pile de pièces d'or séparées par des rondelles de drap humectées d'une dissolution saline.

Ritter constata que le platine, le cuivre, le laiton, le fer et le bismuth donnaient des résultats analogues.

Le résultat qu'il obtint avec le plomb était insignifiant, parce qu'il se servait d'eau salée comme liquide, ce qui donnait naissance à du chlorure de plomb très peu soluble et très mauvais conducteur.

En 1826, De La Rive appela de nouveau l'attention des physiciens sur le voltamètre à lames de platine et à eau acidulée sulfurique.

Jusqu'en 1859, un grand nombre de savants firent paraître des travaux intéressants sur la polarisation voltaïque. Mais toutes les recherches que l'on entreprit à ce sujet restèrent sans résultat pratique.

C'est pourquoi nous passerons immédiatement aux travaux qui devaient conduire à la réalisation d'un véritable accumulateur industriel.

§ 1.

ACCUMULATEUR PLANTÉ.

En 1859, un physicien français, M. Gaston Planté, aussi modeste que savant, montrait, dans un premier travail, qu'en recueillant les *courants de polarisation,* qui étaient la cause d'affaiblissement des piles voltaïques, on pouvait très utilement les mettre à profit pour *accumuler* l'énergie d'un courant primaire.

Avant Planté, tous les physiciens s'appliquaient à combattre, au sein des piles voltaïques, la production de ces courants de polarisation, et nous devons ajouter que Becquerel, père, parvint très heureusement à neutraliser ces courants d'affaiblissement dans la pile à deux liquides et à courant constant.

Comme on le voit, M. Planté s'était placé à un point de vue diamétralement opposé; il reconnut le grand rôle que pouvait jouer le courant secondaire dans l'accumulation de l'énergie de la pile voltaïque. Au lieu d'empêcher la production des courants de polarisation qui arrêtaient le développement des réactions chimiques, il mit tous ses efforts à les amplifier; c'est lui qui a le premier montré la possibilité d'emmagasiner *pratiquement* le travail électro-chimique; c'est pourquoi nous pouvons dire que Planté est le véritable inventeur des accumulateurs électriques.

C'est par l'étude des courants secondaires engendrés par des voltamètres de divers métaux, que ce savant physicien est arrivé à réaliser ses batteries d'emmagasinement. On consultera avec fruit son remarquable ouvrage : *Recherches sur l'électricité;* c'est une source inépuisable de renseignements utiles à tous ceux qui voudront imaginer et expérimenter des piles secondaires.

Comme nous l'avons dit plus haut, Planté a étudié les courants secondaires produits par les métaux pauvres et les métaux nobles. A la suite de cette étude, il reconnut que la force électro-motrice d'un voltamètre à base de plomb et à eau acidulée sulfurique était plus énergique et plus persistante que celle de tous les autres métaux.

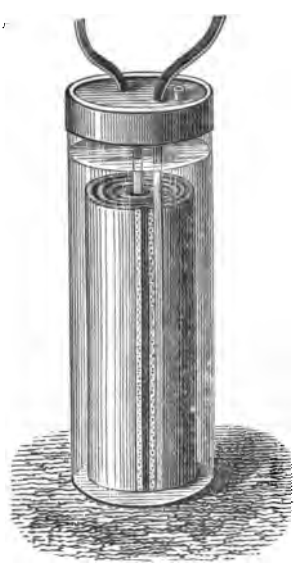

Fig. 8.

Il ne s'agissait plus alors, pour constituer un appareil de grande puissance, que de lui donner une forme appropriée à la nature des électrodes.

« Nous fûmes conduits, dit Planté, à construire, en 1860, un élément secondaire de grande intensité, en employant une disposition analogue à celle qu'Offerschaus et Hare avaient employée pour la pile voltaïque proprement dite, c'est-à-dire en

enroulant en spirale deux longues et larges lames de plomb, séparées l'une de l'autre par une toile grossière, et les plongeant ensuite dans un bocal plein d'eau acidulée au 1/10 par l'acide sulfurique. La fig. 8 montre la disposition d'un couple secondaire de cette nature. »

Si on fait passer à travers un tel élément, le courant primaire de deux couples de Bunzen, par exemple, on reconnait, après avoir détaché la pile primaire, que l'accumulateur est susceptible de donner des effets même plus intenses que ceux de la pile qui a servi à le charger. Il y a donc bien un *emmagasinement* du travail de la pile voltaïque.

M. Planté supprima ensuite la toile qui introduisait une résistance intérieure additionnelle et qui s'altérait

Fig. 9.

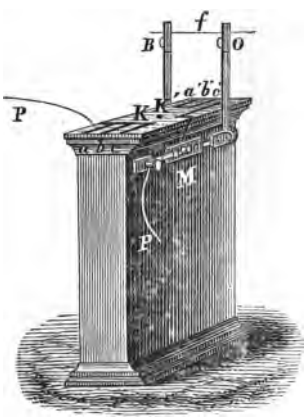

Fig. 10.

à la longue dans l'eau acidulée. Les lames de plomb venaient alors en contact et l'accumulateur ne fonctionnait

plus. La toile fut remplacée par des baguettes isolantes. Mais en même temps M. Planté substituait aux lames en spirales, des lames plates et parallèles placées dans des récipients en gutta-percha. Les prolongements des lames de rang pair étaient réunis d'un côté pour former l'un des pôles de l'accumulateur et les prolongements des lames de rang impair, réunis de l'autre côté, constituaient le deuxième pôle. (Fig. 9 et 10.)

Planté a constaté que les vases en gutta-percha subissaient, au bout d'un certain temps, un retrait qui avait pour effet de rapprocher les lames et même de les

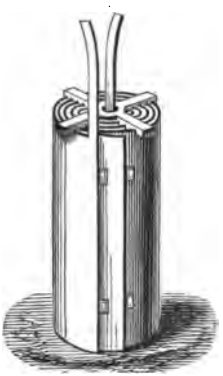

Fig. 11.

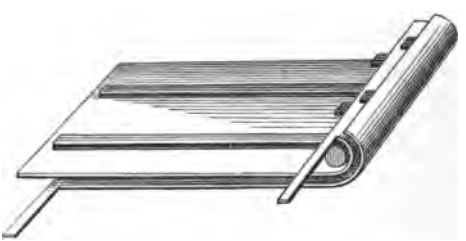

Fig. 12.

amener au contact. De plus, voulant étudier, d'une façon très attentive, les phénomènes qui se passaient à l'intérieur du récipient, Planté revint à une disposition à peu près semblable à la première que nous avons mentionnée. Les lames de plomb étaient de nouveau enroulées en spirales, mais leur séparation se faisait au

moyen de bandes étroites en caoutchouc, comme l'indiquent les figures 11 et 12.

M. Planté décrit le mode de fabrication de ce système de la manière suivante :

« Deux paires de bandes de caoutchouc d'un centimètre environ de largeur sur un demi-centimètre d'épaisseur sont nécessaires pour empêcher les lames de se toucher réciproquement. Les lamelles qui forment leur prolongement sont taillées aux extrémités opposées des lames, pour mieux éviter les causes de contact et pour égaliser la distribution du courant primaire sur les surfaces des électrodes en éloignant, l'un de l'autre, les deux points par lesquels débouchent l'électricité positive et l'électricité négative dans le couple secondaire. Toutefois cette disposition n'est pas indispensable, si les lames de plomb sont enroulées bien uniformément l'une autour de l'autre. L'action chimique du courant primaire se distribue alors également sur toute la surface du couple secondaire, quand même les deux pôles de la pile y débouche-raient très près l'un de l'autre.

« On enroule donc les lames de plomb ainsi séparées par deux ou trois paires de bandes de caoutchouc autour d'un cylindre en bois ou en métal, comme le montre la figure 12. Ce cylindre devant être retiré, une fois le couple achevé, sa nature est indifférente.

« Il convient aussi de placer deux petites bandes de caoutchouc transversales, de la longueur du cylindre, devant les extrémités des bandes longitudinales, lorsqu'on commence à enrouler la première spire, afin de bien séparer les bords des deux lames de plomb qui pourraient tendre à se toucher.

« L'enroulement une fois effectué, on enlève, avec précaution, le rouleau intérieur, et pour donner plus de stabilité au système, on maintient les spires à leur place, d'une manière

définitive, à l'aide de petits croisillons en gutta-percha ramollis par la chaleur.

« Le couple ainsi construit est introduit ensuite dans un vase cylindrique en verre, et assujetti, à l'intérieur, par de petites calles en gutta-percha. Le vase est rempli d'eau acidulée au $\frac{1}{15}$ par l'acide sulfurique. »

Tel est le couple Planté qui est le plus employé aujourd'hui.

Dans les premiers temps qu'un pareil couple fonctionne, les effets obtenus pendant la décharge ne se conservent pas longtemps. Mais M. Planté a reconnu que par une opération qu'il a appelée la *formation des couples secondaires*, il pouvait leur donner la faculté de conserver la charge pendant une longue durée, en même temps qu'il augmentait, de cette façon, la puissance d'emmagasinement du travail chimique de la pile voltaïque.

En examinant les phénomènes qui se formaient dans un voltamètre à lames de plomb, nous avons trouvé que le courant secondaire résultait, d'une part, de la réduction de la couche de peroxyde de plomb produite sous l'action du courant primaire, et, d'autre part, de l'oxydation de la couche réduite pendant la charge.

L'opération que M. Planté a désigné sous le nom de *formation* a pour but de peroxyder profondément l'une des électrodes et de réduire l'autre à un tel état de division que les actions chimiques peuvent s'exercer d'une façon complète pendant la charge et la décharge.

On parvient à ce résultat en chargeant les accumulateurs un grand nombre de fois et en les déchargeant au fur et à mesure. Ce résultat est obtenu d'une façon plus marquée, en effectuant des changements de sens du courant primaire, et en laissant entre ces changements des intervalles de repos.

Supposons que nous prenions un couple neuf. Sous l'influence d'une première charge, l'électrode positive est peroxydée, et l'électrode négative est réduite. Si on décharge alors l'accumulateur, l'oxygène se porte sur la lame qui tantôt était négative. De sorte que sa surface passe à l'état de P*b*O. L'autre électrode, au contraire, passe à un degré d'oxydation moindre, P*b*O.

Chargeons de nouveau l'accumulateur, mais en sens inverse. L'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau devra réduire d'abord la couche d'oxyde produite sur l'électrode primitivement négative, au lieu de la couche évidemment plus faible qui résultait de l'exposition à l'air de la lame.

Quant à l'oxygène, il a plus de prise sur la lame qui a subi une première décharge; la combinaison se fait avec plus de facilité, de sorte que la pellicule augmente d'épaisseur. Si l'on fait subir à l'accumulateur une nouvelle décharge, les mêmes phénomènes se reproduisent, mais avec plus d'énergie que précédemment.

Il se fait ainsi que l'action du courant primaire dans les deux sens augmente les épaisseurs des couches peroxydées et réduites. C'est une sorte de tannage électro-chimique ; c'est une véritable *cémentation*

galvanique à laquelle les repos entre les changements de sens sont très favorables, car ils permettent aux lames d'acquérir une texture cristalline et, par ce fait, une forte adhérence. Quand un accumulateur Planté est suffisamment formé, on le charge toujours dans le même sens. On peut donc dire que le travail du courant primaire s'est accumulé sous la forme d'oxydation du plomb, d'une part, et de réduction du plomb, d'autre part.

L'opération de la *formation* d'un accumulateur Planté est extrêmement longue et c'est ce qui a retardé si longtemps l'emploi de cet appareil dans les applications industrielles. Ce n'est qu'après plus de 500 heures de formation qu'un tel élément peut rendre de véritables services dans l'industrie. Après 150 heures de formation on ne peut guère compter qu'un couple Planté donne plus de 5 000 coulombs par kilogramme de plomb; après 500 heures, lorsque la formation a été faite avec grand soin, un kilogramme de plomb peut avoir une capacité d'emmagasinement de 10 000 à 12 000 coulombs. Dans des couples très vieux, et admirablement formés, Planté est parvenu à faire débiter 36 000 coulombs par kilogramme de métal. Mais l'on conçoit que cette durée de formation, absolument désespérante, est excessivement coûteuse, et doit être la cause des prix élevés des accumulateurs appartenant au système Planté.

Dans une note présentée à l'Académie des sciences de Paris en 1882, M. Planté rend compte d'un nouveau procédé qu'il a imaginé pour obtenir une formation plus rapide.

« Le procédé, dit-il, consiste à soumettre les couples secondaires à une sorte de décapage profond par l'acide azotique, étendu de moitié en volume d'eau, en les laissant immergés dans ce liquide pendant 24 à 48 heures. Les couples sont ensuite vidés, lavés, très complètement remplis d'eau acidulée au dixième par l'acide sulfurique et soumis à l'action du courant primaire. Par cette immersion dans l'acide nitrique étendu, une portion de plomb se dissout, sans doute, mais l'épaisseur des lames n'en est pas notablement diminuée, et par suite de la porosité métallique, l'action chimique ne se borne pas seulement à la surface des lames de plomb; elle s'exerce aussi à l'intérieur, crée de nouveaux intervalles moléculaires et facilite, en conséquence, la pénétration ultérieure de l'action électrolytique du courant primaire.

« Les couples secondaires ainsi traités peuvent fournir en 8 jours, après 3 ou 4 changements de sens du courant primaire, des décharges de longue durée, alors que, sans l'action préalable de l'acide nitrique, ils ne pourraient donner qu'après plusieurs mois les mêmes résultats. Ce procédé permettra donc d'abréger notablement la formation des couples secondaires et contribuera à en faciliter les applications. »

J'ai fait moi-même un grand nombre d'expériences analogues, et je dois dire que ce procédé n'est pas exempt de certaines critiques. D'abord le lavage des plaques qui ont été trempées dans l'acide nitrique est une opération longue et fastidieuse. Dès qu'on plonge une telle plaque dans un bain d'eau, celui-ci se remplit immédiatement d'un véritable lait de plomb ; il faut renouveler l'eau plus de *cinquante fois* avant que l'immersion de la plaque ne cesse de troubler l'eau. En outre, si l'on examine au microscope la texture d'une

lame qui a subi l'action de l'acide nitrique, on y trouve une infinité de petits trous qui semblent donner à la surface une texture absolument grenue. L'attaque ne se fait pas régulièrement, de sorte qu'on aperçoit une quantité de grains métalliques qui se trouvent en saillie.

J'ai constaté que la durée de la formation était considérablement réduite par ce procédé, mais je dois faire remarquer que les épaisseurs actives de peroxyde de plomb et de plomb réduit ne sont plus, dans ce cas, fixées sur le métal qu'avec une très faible adhérence. C'est ainsi que si le courant de charge est un peu fort, la matière active se détache de son support avec une grande rapidité; les parties en saillie que nous avons mentionnées tombent les premières.

Il ne suffit pas, comme on est généralement porté à le croire, que, pour obtenir des effets énergiques et de longue durée, les matières actives soient purement et simplement appliquées contre une lame métallique formant le support de l'électrode. Nous aurons occasion de revenir sur ce point des plus importants en parlant des accumulateurs Faure; mais nous croyons dès maintenant devoir insister sur ce fait qu'il est nécessaire que les matières actives présentent avec le support une cohésion, une adhérence considérable pour assurer un bon contact électrique. Si cette précaution n'est pas rigoureusement observée, le peroxyde de plomb se détache de la plaque et l'appareil doit être formé de nouveau avant de donner des effets d'une certaine puissance.

En résumé, la formation d'un accumulateur Planté a pour effet de transformer le métal des électrodes, sur une grande partie de son épaisseur, en matières actives, en peroxyde de plomb, d'une part, et en plomb réduit, d'autre part. Ce qu'il faut surtout retenir, c'est que, dans le système Planté, l'oxydation du métal est obtenue naturellement par l'action du courant électrique.

Dans d'autres accumulateurs à base de plomb que nous examinerons plus tard, cette matière active est réalisée par un *dépôt artificiel* appliqué contre le support.

C'est pourquoi nous dirons que les accumulateurs Planté sont *à dépôt naturel* de matière active, par opposition à ces derniers.

Le dépôt naturel a l'immense avantage de présenter une durée pour ainsi dire indéfinie, lorsque, bien entendu, la formation a été faite avec grand soin; mais, d'un autre côté, il a le grand inconvénient, comme nous l'avons vu, d'exiger, pour sa formation, une durée extrêmement prolongée qui rend son emploi d'une application assez coûteuse.

Une des particularités intéressantes de l'accumulateur Planté et de ses dérivés, c'est que les charges et les décharges successives, en modifiant la nature de la surface des électrodes, conservent aux lames leur poids primitif. Les lames de plomb ne servent que de point d'appui aux réactions chimiques; il n'y a donc point d'usure, dans l'acception propre du mot, et, par conséquent, le poids du métal reste le même.

Les accumulateurs Planté bien formés conservent leur charge pendant très longtemps. Ainsi Planté a obtenu des effets très sensibles avec des appareils qui étaient restés au repos plus d'un mois après avoir subi l'action de la charge.

Quant à la provision de travail électrique disponible pendant la décharge, elle dépend de la grandeur des électrodes, du degré de leur formation, et enfin de la résistance du circuit extérieur.

La constance de la décharge peut parfaitement être assimilée à l'écoulement d'un liquide par un orifice pratiqué à la partie inférieure d'un vase très large et de peu de hauteur. Toutefois la résistance du circuit extérieur joue un rôle très considérable sur le diagramme de la décharge. Nous avons expliqué ce phénomène en étudiant la polarisation des accumulateurs électriques.

En ce qui concerne la force électro-motrice d'un élément Planté, on constate qu'elle varie avec le degré de formation. Après 75 heures de formation, la force électro-motrice utilisable n'est guère que de $1^{volt},6$. Après 500 heures elle est de $1^{volt},9$ et dans des couples exceptionnellement bien formés, elle atteint le chiffre de $2^{volts},15$. Nous devons également signaler, au sujet de la force électro-motrice, le fait suivant :

Immédiatement après la rupture du courant primaire, on constate, si on décharge l'accumulateur, que la force électro-motrice a une valeur supérieure à celle que nous venons de citer; mais ce maximum descend

très rapidement à la valeur normale qui reste alors constante pendant presque toute la durée de la décharge. Cet accroissement de force électro-motrice dépend, comme nous l'avons vu en étudiant le voltamètre au plomb, de produits suroxygénés et suroxydés qui se sont formés tout autour des électrodes.

Planté a mesuré le *rendement* de ses couples secondaires, et par *rendement,* il entend le rapport du travail électrique *restitué* par la décharge à celui du travail électrique *dépensé* pour la charge. Pour en déterminer la valeur, Planté s'est servi de la décomposition du sulfate de cuivre dans un voltamètre qu'il introduisait dans le circuit de l'accumulateur. Le rendement obtenu dans un grand nombre d'expériences a été de 88 à 89 pour 100.

Comme le dit très bien Planté, d'après le rendement obtenu presque égal à 90/100, on voit qu'un couple secondaire à lames de plomb, bien *formé,* constitue un accumulateur assez parfait du travail de la pile voltaïque.

Telles sont, exposées brièvement, les considérations qui caractérisent les couples de Planté et de tous ses dérivés. Nous aurons à examiner plus tard les moyens pratiques à employer pour rendre industrielles les diverses opérations qui se rapportent au travail des accumulateurs électriques.

§ 2.

ACCUMULATEUR DE MERITENS.

L'accumulateur de M. Planté, avec ses plaques de plomb d'une épaisseur variant de un demi-millimètre à un millimètre, avait l'inconvénient de donner une surface relativement faible pour un poids donné de métal.

Or, comme la capacité d'emmagasinement d'un accumulateur dépend en grande partie de la surface active des électrodes, M. de Meritens s'est proposé d'augmenter la surface sans accroître le poids des électrodes. Voici comment il s'y est pris :

Supposons que l'on empile les unes sur les autres une série de lamelles de plomb de 0,015 de largeur et de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, la longueur étant égale à la longueur de l'électrode. S'il existe entre chaque lamelle un très petit intervalle qui permet la libre circulation du liquide, il est clair que la surface réalisée de cette manière sera considérable ; elle est, en effet, égale à la somme des surfaces de chaque lamelle. On ne peut mieux comparer les électrodes de l'accumulateur de Meritens qu'aux pages d'un livre, ayant la largeur indiquée ci-dessus, alors que chaque page serait séparée de sa voisine par un petit intervalle.

C'était évidemment un premier progrès réalisé dans la voie industrielle. Malheureusement, les réactions

chimiques qui prennent naissance dans un accumulateur au plomb ont pour effet d'augmenter le volume des lames peroxydées. Il se fait ainsi que dans l'accumulateur de Meritens, l'augmentation de volume a pour résultat d'amener toutes les lamelles au contact. Celles-ci pressent alors les unes sur les autres ; la surface active de l'électrode se réduit, par conséquent, dans de grandes proportions, de sorte que l'avantage prévu finit par disparaître.

On objectera sans doute que, pour obvier à cet inconvénient, il suffit d'espacer les lamelles suffisamment pour les empêcher d'arriver au contact. Ce serait parfait, s'il n'existait pas le deuxième inconvénient suivant :

Sous l'action du courant primaire, la surface métallique de l'électrode se transforme en peroxyde de plomb ; mais pour que l'appareil donne des effets d'une puissance industrielle, il faut que la couche de matière active ait une épaisseur de quelques dixièmes de millimètre. Prenons, par exemple, une des nombreuses lamelles entrant dans une électrode de l'accumulateur de Meritens ; donnons-lui une épaisseur de 4 dixièmes de millimètre. Au fur et à mesure que l'appareil se forme, nous savons que les actions chimiques pénètrent plus profondément à l'intérieur du métal de l'électrode. Or, il ne faut pas que la formation soit bien avancée, pour que deux dixièmes de millimètre de l'électrode métallique aient été transformés en peroxyde. Notre lamelle de 4 dixièmes de millimètre d'épaisseur, subissant de chaque côté les actions chimiques, soit sur

2 dixièmes de millimètre de part et d'autre, sera complètement transformée au bout de peu de temps, en matière active.

L'expérience prouve que, dans ces conditions, l'appareil ne fonctionne plus. Il est nécessaire, pour que l'accumulateur puisse marcher, que la matière active soit directement en contact avec un support bon conducteur de l'électricité. Si cette condition n'est pas rigoureusement satisfaite, la résistance intérieure de l'accumulateur grandit et finit par mettre l'électrode positive hors d'usage.

§ 3.

ACCUMULATEUR ARNOULD ET TAMINE.

Lorsque nous nous sommes occupé, en collaboration avec M. Arnould, alors ingénieur principal au corps des mines, de l'étude des accumulateurs électriques, on ne connaissait guère que les accumulateurs Planté, Faure et de Meritens.

Nous n'avions pas tardé à reconnaître que les plaques planes de M. Planté présentaient l'inconvénient de donner, pour un poids déterminé de plomb, une surface relativement faible.

Quant aux accumulateurs Faure, le simple plaquage contre un support métallique d'un oxyde plombique, ne nous paraissait pas réaliser une adhérence suffisante entre l'oxyde et son support, ce qui, d'une part, contrariait les actions électriques, et, d'autre part, permettait à l'oxyde de se détacher de son support avec une trop grande facilité.

Enfin, en ce qui concerne l'accumulateur de Meritens, nous avions reconnu que les lamelles de plomb appliquées les unes contre les autres, à la façon des feuillets d'un livre, finissaient par produire, à cause de l'augmentation de volume du métal, une grosse masse de plomb qui rendait inactives les surfaces de chacune des lamelles, en sorte que les deux surfaces latérales de l'électrode travaillaient presque seules dans l'appareil.

Voulant surtout donner à nos électrodes une grande surface utile et pratique, voici le raisonnement qui nous a conduit à réaliser nos éléments :

Si l'on prend une plaque plane, en plomb, carrée, de un mètre de côté et de un millimètre d'épaisseur, la surface des deux côtés de cette plaque sera de 2 mètres carrés et son poids de $11^{k.}$,350.

Si l'on remplace une telle plaque par une autre, formée de fils de plomb jointifs de un millimètre de diamètre et de un mètre de longueur, on pourra disposer mille fils semblables pour réaliser le carré de un mètre de côté. La surface d'une telle plaque sera de $3^{m.^2}$,14 et son poids de $8^{k.}$,900.

Avec un poids de $11^{k.}$,350, trouvé dans le premier cas, on obtiendrait, au moyen de fils, une surface d'environ 4 mètres carrés, c'est-à-dire double de celle d'une plaque plane.

Ces quelques détails suffisent pour faire voir les avantages que l'on obtient, en pratique, par la substitution des fils aux éléments plans.

Les divers types d'accumulateurs que nous avons combinés reposaient spécialement sur l'emploi de fils métalliques.

Nos premiers accumulateurs étaient formés de la manière suivante :

Autour d'une baguette en verre, on enroule un fil de plomb d'une grande longueur, de manière à serrer les spires les unes contre les autres. Autour de cette première rangée de spires, on place une feuille de papier

parcheminé qu'on maintient dans sa position au moyen d'un fil de laine. Une deuxième rangée de spires est ensuite enroulée autour du papier parcheminé. Chaque rangée est terminée par un bout de fil qui forme le pôle de l'électrode.

Souvent nous employons 4, 6 et même 8 rangées de spires de fil métallique, séparées l'une de l'autre par une simple feuille de papier parcheminé. Celle-ci a pour but d'empêcher le contact de deux rangées successives; mais elle donne en même temps à l'accumulateur une résistance intérieure additionnelle.

La baguette de verre sert uniquement à la construction de l'élément; elle est retirée quand l'électrode est achevée.

Dans certains accumulateurs, les deux électrodes sont constituées par des rangées alternatives de fils de plomb et de fils de cuivre; le bain est alors une solution saturée de sulfate de cuivre, légèrement acidulée.

Dans d'autres accumulateurs, toutes les rangées sont formées de fils de plomb, et le bain est de l'eau acidulée sulfurique; c'est alors une simple modification de la pile de Planté.

L'étude de ces deux genres de piles secondaires fait très bien saisir le phénomène de la polarisation des accumulateurs électriques.

Il suffit de prendre un élément de chaque système constitué par deux rangées seulement de fil métallique. On les charge pendant cinq minutes au moyen de deux couples de Bunzen et on les décharge ensuite sur

un fil de platine de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur.

Nous avons constaté maintes fois que le couple P*b* — P*b* ne pouvait rougir le fil de platine que pendant une minute et demie, alors que le couple P*b* — C*u* le maintenait incandescent pendant huit minutes.

Seulement il se fait qu'après quelques instants de repos, la pile secondaire P*b* — P*b* rougit de nouveau le fil de platine en question et sensiblement pendant le même temps. Un nouveau repos amène une nouvelle incandescence, et ce phénomène se répète aussi longtemps que le couple n'est pas complètement déchargé.

Dans l'élément P*b* — C*u*, ces décharges *résiduelles*, comme les appelle M. Planté, sont presque nulles. Chaque jet électrique, si nous pouvons ainsi nous exprimer, a une plus longue durée, ce qui est évidemment avantageux dans la pratique.

Cette expérience si élémentaire montre clairement que l'accumulateur à base de plomb ne pourra guère servir, lorsqu'on voudra utiliser le travail emmagasiné sous la forme d'une décharge *continue* sur un circuit extérieur de résistance très faible.

Si, au lieu d'opérer sur des couples de quelques centaines de grammes, on se servait d'éléments de plusieurs kilogrammes pour éclairer, par exemple, un grand nombre de lampes à incandescence, placées en dérivation, on constaterait également que les éléments, genre Planté, se polariseraient avec une telle rapidité que les lampes s'éteindraient au bout de très peu de temps. Un

repos de quelques minutes permettrait un nouveau rallumage, et ce phénomène se reproduirait un nombre de fois d'autant plus grand que la résistance extérieure serait plus faible, c'est-à-dire qu'il y aurait plus de lampes groupées en dérivation.

L'inconvénient de notre système d'accumulateur, c'est que le papier parcheminé se détruit assez rapidement dans un liquide acidulé; il finit par former une véritable bouillie et les électrodes arrivent alors en contact, ce qui met l'appareil hors d'usage.

De plus, la présence du papier parcheminé crée une résistance intérieure, très faible, je le veux bien, mais néanmoins réelle, ce qui est toujours un désavantage.

C'est pourquoi nous avons remplacé le papier parcheminé par quelques baguettes en caoutchouc durci; les électrodes se trouvaient ainsi directement en présence; la résistance intérieure était diminuée de près de moitié; mais ces baguettes coûtent relativement fort cher.

Nous avons alors substitué à ce système la disposition suivante : Le fil, au lieu d'être enroulé en hélice, formait une spirale horizontale, et toutes les spirales étaient alors superposées et séparées soit par une plaque en terre poreuse, soit par des bouts de baguette en caoutchouc durci.

C'était une véritable *pile d'électrodes*.

Les plaques en terre poreuse doublaient la résistance intérieure qu'avait un tel élément dans lequel les spirales étaient en présence l'une de l'autre et séparées par des baguettes en caoutchouc.

Malheureusement, lorsque les accumulateurs doivent être transportés, les spirales se dérangent trop facilement. C'est pourquoi, afin de donner à l'électrode une rigidité suffisante, nous avons supprimé les deux sys-

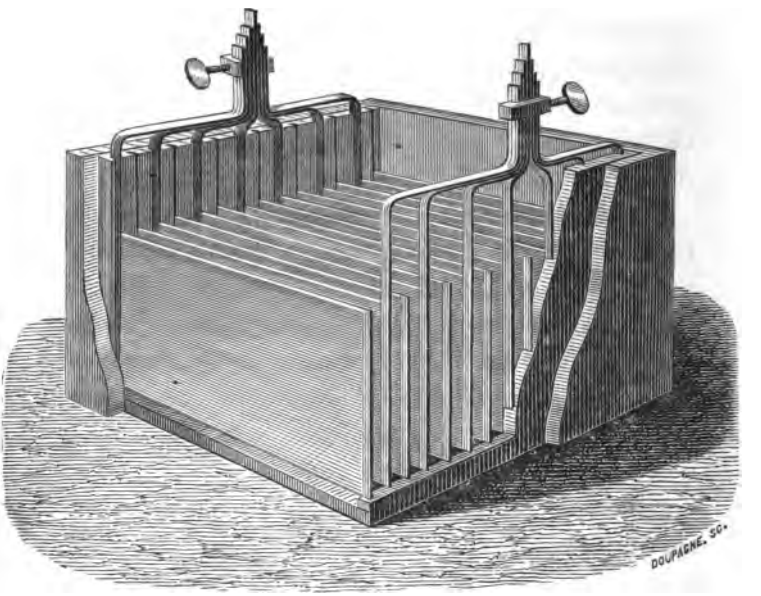

Fig. 13.

tèmes que nous venons de décrire pour les remplacer par des plaques constituées par des séries de fils métalliques parallèles, de même longueur et aussi jointifs que possible (fig. 13); les extrémités des fils sont réunies par une soudure antogène.

Lorsque la longueur des fils et, par conséquent, de

l'électrode est trop grande, on pratique une ou plusieurs soudures, de manière à donner une plus grande rigidité à la plaque ainsi formée.

Il y a lieu de remarquer que l'épaisseur des électrodes n'est jamais que d'un seul fil, ce qui a pour avantage d'utiliser la surface toute entière de ces plaques.

Le mode de séparation des électrodes dépend de leur longueur ; si celle-ci est supérieure à $0^{m}.,20$, la séparation se fait au moyen de baguettes isolantes en bois parafiné ; ces baguettes servent, en outre, à caler convenablement les éléments de l'accumulateur. Quand la longueur est inférieure à $0^{m}.,20$, on fait glisser les électrodes dans des planchettes en bois parafiné, munies de rainures faiblement espacées.

Pour les applications industrielles, il est utile de donner aux fils métalliques un diamètre de un millimètre au minimum, parce que si toute l'épaisseur du fil vient à être transformée en matière active, la résistance intérieure de l'accumulateur augmente considérablement.

Il est évident qu'en diminuant le diamètre des fils, on obtiendrait des effets plus considérables pour un poids donné de métal, mais cet accroissement ne serait atteint qu'au détriment de la durée des appareils.

Comme il est avantageux de donner à l'électrode positive une surface supérieure à celle de l'électrode négative, nous avons remplacé les éléments en fils de cuivre par des éléments plans de ce même métal.

Les accumulateurs Pb — Cu ont malheureusement

un inconvénient qui rend impossible leur emploi dans l'industrie. Au bout de quelques mois de fonctionnement, on n'est pas peu surpris de constater que les éléments en cuivre sont percés d'un grand nombre de trous qui résultent de la dissolution de ce métal dans une solution de sulfate de cuivre acidulée.

C'est pour obvier à cet inconvénient que nous avons remplacé le cuivre par une plaque de charbon. Dans ces conditions, l'accumulateur est bon. Il faut toutefois avoir soin de veiller au contact du raccord avec la plaque de charbon. Ce contact est toujours chose extrêmement délicate. Le sel de cuivre grimpe le long des queues des électrodes avec une grande facilité, et encrasse rapidement toutes les parties situées hors du liquide. Il se fait ainsi que les accumulateurs à sulfate de cuivre réclament un entretien considérable.

Au commencement de cette année, j'ai abandonné le système d'accumulateurs à fils pour adopter les accumulateurs à plaques agglomérées que nous étudierons plus loin.

Indépendamment des considérations qu'on lira plus tard, lorsque nous analyserons ce dernier système de piles secondaires, nous ferons remarquer, pour le moment, que l'économie financière à résulter de la substitution des fils aux éléments plans n'est pas en rapport avec l'augmentation de surface que l'on obtient par cette substitution. En effet, le fil de plomb de un à deux millimètres coûte moitié plus cher que le plomb laminé, et si l'on y ajoute la dépense à résulter de la fabrication

de l'électrode, on constate que la surface double obtenue par les fils coûte à peu près le double des surfaces planes, de sorte que le profit se réduit à bien peu de chose.

Il n'en est pas moins vrai que les fils métalliques permettent de réduire le poids du métal pour obtenir une surface relativement considérable. A ce point de vue, les électrodes à fils constituent un avantage réel.

§ 4.

ACCUMULATEUR DE KABATH.

M. de Kabath a réalisé un accumulateur qui repose sur le même principe que celui de M. Planté. Le problème qu'il s'est proposé de résoudre, consiste à obtenir une surface considérable tout en conservant au système un poids relativement modéré. Voici la description des électrodes de l'accumulateur de M. de Kabath :

Chaque lame est constituée au moyen d'une série de lanières de plomb alternativement gaufrées et plates. Ces lanières sont placées dans un cadre extérieur rigide sur lequel sont fixées deux plaques de plomb percées de trous qui permettent la circulation du liquide (fig. 14).

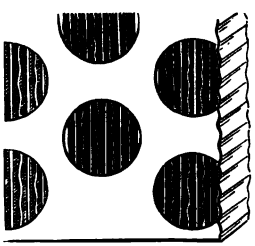

Fig. 14.

Je ne crois pas que cette électrode a un bien grand avenir. Les deux inconvénients signalés dans la description de l'accumulateur de Meritens reparaîtront certainement dans celui-ci.

En effet, en supposant que toute la surface des lanières puisse être active pendant les premiers mois du fonctionnement de l'accumulateur, il est évident que la formation, s'avançant de jour en jour et pénétrant à

travers le métal des lanières, finira par transformer complètement en matière active le métal de ces lamelles. La faible épaisseur de quelques dixièmes de millimètre doit rapidement amener cette transformation. On sait que, dans ces conditions, la résistance intérieure augmente et ainsi le travail électro-chimique est extrêmement pénible; l'appareil est mis alors rapidement hors d'usage.

De plus, l'on ne peut pas oublier que le plomb, en se transformant en peroxyde, augmente de volume, ce qui doit avoir pour effet de supprimer les ondulations et d'aplatir toutes les lanières qui ne tarderont pas à se trouver en contact. Cet effet est surtout sensible lorsque les lanières sont placées horizontalement. L'avantage de l'augmentation de surface se réduit alors considérablement.

Ces quelques considérations nous autorisent à dire que la longue durée des accumulateurs que recherchait M. de Kabath ne sera pas obtenue. Au contraire, la durée n'aura d'autre résultat que de réduire la puissance de son appareil, attendu qu'en produisant le contact des lanières, elle diminuera proportionnellement les surfaces actives.

Dans notre système d'accumulateur à fils, il y a lieu de remarquer que lorsque deux fils sont juxtaposés, le contact ne peut jamais se produire que suivant une génératrice.

§ 5.

ACCUMULATEUR FAURE.

« L'accumulateur est un appareil d'avenir, et il aurait sans doute déjà fait son chemin si son apparition n'avait pas été saluée d'une réclame mal comprise. »

Ainsi s'exprime M. l'ingénieur A. Bandsept dans un article qu'il a publié le 28 février 1884, dans le *Moniteur industriel* sur la *capacité d'emmagasinement des accumulateurs*.

Nous avons lu cet article avec un très vif intérêt; c'est certainement un des plus sérieux qui aient été écrits sur ce sujet depuis que M. Planté a publié le résultat de ses recherches.

La phrase que nous citons, en commençant la description de l'accumulateur Faure, trouve bien ici sa place, car c'est cet accumulateur qu'on a songé à exploiter en premier lieu, dans les applications industrielles, et son exploitation dans certains pays a été absolument désastreuse.

Les promoteurs des accumulateurs Faure n'envisagèrent malheureusement que le côté financier de l'affaire qu'ils voulaient lancer dans le public. Si cette affaire avait été menée d'une façon sérieuse, il est incontestable que l'accumulateur Faure aurait fait son chemin et que ses applications à l'heure actuelle seraient nombreuses. Disons immédiatement que M. Faure n'a

jamais appuyé les assertions des promoteurs de son invention. Le principe sur lequel M. Faure avait basé sa pile était faux ; c'est pourquoi son accumulateur n'a jamais répondu aux grandes promesses qui furent faites à l'origine, même par des physiciens qui jouissaient d'un certain renom dans la science électrique.

Le grand inconvénient de la pile Planté réside, comme nous l'avons dit, dans la longue durée exigée pour sa formation. M. Planté avait bien supposé qu'en déposant du minium sur ses électrodes en plomb, il réduirait le temps de la formation de ses couples; mais il ne parvint jamais à donner une adhérence suffisante au minium qui s'écaillait et finissait par disparaître.

M. Faure reprit le problème, et imagina certains moyens qui permirent de fixer la pâte de minium d'une façon relativement convenable.

D'un autre côté, M. Planté avait dit que la puissance d'emmagasinement de sa pile dépendait de l'épaisseur des matières actives, peroxyde de plomb, d'une part, et plomb réduit, d'autre part. Ce principe n'était vrai que dans le cas où la couche de matière active se trouvait placée dans des conditions qui lui permettaient de fonctionner utilement dans toute son épaisseur.

C'était bien ainsi, d'ailleurs, que le supposait M. Planté. Mais M. Faure a voulu donner une grande extension à ce principe, et il a pensé qu'il suffisait d'accroître l'épaisseur de la couche d'oxyde (minium) pour augmenter proportionnellement la capacité d'emmagasinement des accumulateurs.

En un mot, en appliquant la matière active (le minium) contre le support (la lame de plomb), M. Faure a voulu : 1° diminuer la durée de formation des couples secondaires, et 2° augmenter leur capacité d'emmagasinement.

Nous ne pouvons mieux faire que de donner un extrait textuel du brevet même de M. Faure :

« La lame de plomb servant de support, ou la surface de support, est recouverte d'abord, par voie galvanoplastique, ou par dépôt, sous forme de pâte, d'une matière ou composition active qui peut être, soit du minium, soit un autre oxyde de plomb, ou bien un sel insoluble de plomb, ou bien encore un sel métallique capable de satisfaire au but proposé.

« Cette composition active est ensuite recouverte par du feutre, du drap, du carton d'amiante, de la toile, ou par toute autre matière poreuse non susceptible d'altération par suite de sa destination.

« Cette substance poreuse a pour objet de *maintenir en place* contre le support la composition active.

« On pourrait évidemment se servir également *pour cet objet* de toile métallique en fils de plomb, ou fils d'autres métaux convenables.

« Il faut alors fixer au support cette couverture poreuse de maintien de la composition, et cette fixation peut s'effectuer par différents moyens, suivant la nature de ce support, c'est-à-dire ne donnant pas de produits nuisibles par l'action du liquide de la batterie.

« Au lieu de rivets disposés çà et là, on peut employer une pression continue avec des fils de laine disposés au travers du tout ensemble, ou bien mastiquer la couverture poreuse en quelques points sur le support, ou bien disposer un treillis en osier, en caoutchouc, ou toute autre matière, de telle façon

que, s'abritant entre les deux supports formant un couple, ce treillis maintienne les deux couvertures en leurs places du même coup.

« Le but de cette disposition est de laisser autant d'espace libre que possible entre les deux couvertures opposées des deux éléments d'un couple pour le libre échappement des gaz

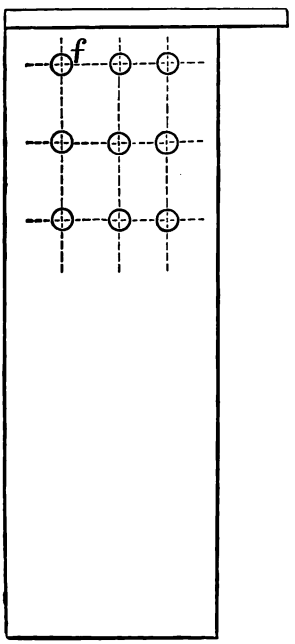

Fig. 15.

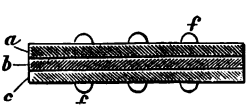

Fig. 16.

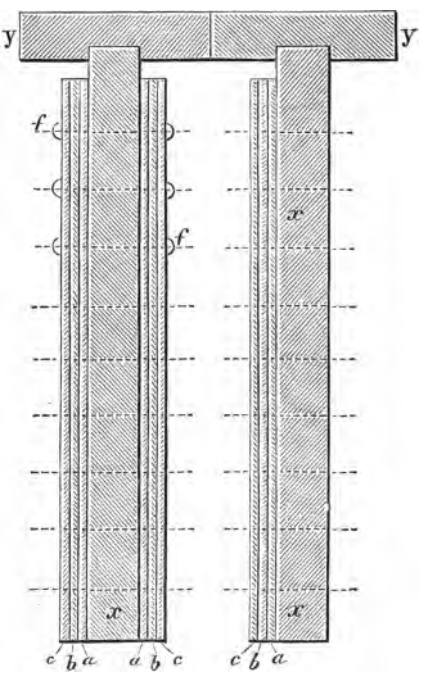

Fig. 17.

qui peuvent se dégager pendant le chargement des couples.

« L'espace entre les deux éléments peut aussi être rempli par toute autre matière poreuse, telle que : du gros feutre, du gravier, ou toute autre matière concassée et neutre à l'action des liquides employés.

« Le dessin annexé représente, fig. 15, en élévation, et fig. 16 et 17, en sections transversales, un support *a* recouvert d'une couche *b* de pate de minium, cette pâte étant maintenue contre le support *a* par un feutre poreux *c* assujetti par des rivets.

« En enroulant ou avant d'enrouler deux lames, on interpose des bandes de caoutchouc ou autres matières de même nature, gutta-percha, fil de laine, de coton, etc., pour donner libre passage aux gaz qui se développent.

« Quand les lames-supports doivent être mises en place et placées, soit parallèlement, soit dans toute autre position et sous toute forme, qui laisse le dit support ou lame sans protection contre les actions mécaniques gauchissantes ou tendant à déformer ces lames, et, par là, à détériorer la batterie, je donne de la rigidité aux lames de plomb ou supports, en les appliquant sur des planchettes en bois, en caoutchouc durci, ou sur tout autre support rigide. »

En résumé, comme on vient de le voir, la pile secondaire de Faure diffère de la pile Planté en ce sens que l'oxyde de plomb est fixé mécaniquement, au lieu d'être formé électriquement.

Rappelons tout d'abord que cette idée n'est pas neuve et que les dépôts préalables de substances sur des supports ont déjà été proposés, pour électrodes de piles primaires, par MM. de La Rive, Becquerel père, Marié-Davy et Edmond Becquerel (voir à ce sujet les *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris,* t. XVI,

1843; t. XXII, 1846; t. XLIX, 1859; t. L, 1860). Quant aux piles secondaires, nous avons vu que M. Planté avait eu cette idée bien avant M. Faure. Ce qu'il faut donc surtout retenir du procédé de M. Faure, c'est le système employé pour maintenir l'oxyde contre le support. A ce point de vue, a-t-il eu plus de succès que M. Planté? C'est ce que nous allons examiner. Il se fait que momentanément et pendant les quelques premiers mois du fonctionnement de l'appareil, l'attache paraît suffisante pour que l'accumulateur puisse débiter, pendant la décharge, une quantité d'électricité *un peu* supérieure à celle que M. Planté avait obtenue avant lui. Mais on constate que l'accumulateur ne peut même pas fonctionner pendant une année, précisément parce que l'adhérence laisse à désirer. Il se passe ici certains phénomènes sur lesquels nous croyons devoir attirer l'attention des électriciens.

Lorsqu'une plaque positive d'un accumulateur Faure travaille, c'est surtout *à la surface du support métallique* que les actions chimiques se produisent. Il est évident que ce n'est pas un simple plaquage effectué à la main et maintenu au besoin par du feutre, qui parvient à faire en quelque sorte un seul tout de la couche de minium et de son support. Si l'oxyde était pour ainsi dire emprisonné entre les pores du métal et collé et maintenu en même temps d'une façon très énergique, il n'y aurait alors que la couche de minium qui subirait l'action chimique; la lame-support servirait uniquement de conducteur électrique. Ce serait parfait. Mais dans

l électrode positive de Faure, voici ce qui se présente : la surface de la lame métallique se transforme en peroxyde brun de plomb à texture cristalline, tandis que le peroxyde résultant de la transformation du minium est à texture grenue.

Quand cette double action s'est produite, sur une certaine épaisseur, l'électrode positive ne tarde pas à être mise hors d'usage, par suite du défaut de conductibilité de la couche de peroxyde cristallin qui finit par se transformer en sulfate de plomb très mauvais conducteur. Le minium n'est plus directement en rapport avec le support conducteur et c'est ce qui, à mon avis, empêche alors l'appareil de fonctionner.

De plus, il est à remarquer que si le métal peut se transformer en peroxyde brun à texture cristalline, comme celui-ci gonfle et augmente de volume par cette transformation, il arrivera que le minium sera pour ainsi dire repoussé de la plaque-support. L'observation de Planté sera également applicable ici : le minium s'écaillera, se fendillera et finira par disparaître.

Dans une lettre parue dans le n° 7 du 15 avril 1882 des *Annales de l'Électricité,* M. Faure, en parlant de la théorie chimique de sa pile, disait : « qu'il avait cru observer que pendant la décharge, le plomb réduit devenait Pb^2O, tandis que le plomb peroxydé PbO^4 devenait Pb^2O^3. Mais j'ai observé, ajoutait-il, que ceci n'avait lieu que dans une faible proportion de la masse totale des couches, environ 10 pour cent. J'attribue ceci à la résistance qu'offre une matière quasi solide, comme

la mousse de plomb et ses oxydes, à la transmission de l'onde électrolytique; en fait, une partie considérable de la masse échappe à l'action du courant ».

Il n'est pas possible d'avouer plus complètement la fausseté du principe sur lequel reposait l'accumulateur Faure. De cette couche de 4 à 5 millimètres qui était plaquée sur les lames de M. Faure, il n'y avait que 10 pour cent, c'est-à-dire 4 à 5 dixièmes de millimètre de matières qui participaient aux réactions chimiques! Mais dans les accumulateurs Planté bien formés, la couche de peroxyde cristallin atteint 4 à 5 dixièmes de millimètre! C'est pourquoi la puissance d'emmagasinement des accumulateurs Faure n'a jamais été de beaucoup supérieure à celle des éléments Planté. Évidemment, ce défaut, constaté par M. Faure lui-même, était bien propre à remettre en question son invention.

Il est vrai qu'afin d'augmenter la capacité d'emmagasinement, M. Faure s'est réservé, m'a-t-on dit, d'introduire dans sa pâte de minium des éléments bons conducteurs de l'électricité.

Nous n'avons pas trouvé cette réserve dans ses brevets belges et son brevet allemand. Nous ne connaissons que le charbon qui ait été mélangé à sa pâte.

Nous avons eu l'occasion de faire des essais sur des accumulateurs de ce genre, et nous avons toujours constaté que le charbon n'était pas assez bon conducteur pour répondre au but désiré.

Il est d'ailleurs dit dans le brevet allemand que :

« La porosité du plomb réduit, ou bien celle du peroxyde de

plomb peut être augmentée en combinant ces oxydes ou sels de plomb avec des matières passives, avec du coke, par exemple. »

J'incline fortement à penser que le charbon mélangé aux matières actives a surtout été introduit dans le but non pas d'accroître la conductibilité, mais d'augmenter le degré de porosité de la couche active.

Il est, en effet, à remarquer qu'on avait cru qu'en augmentant cette porosité, on accroîtrait également la capacité d'emmagasinement de l'accumulateur.

On a vu surgir dans ce but une infinité de brevets. Il résulte de nos expériences que ce remède augmente encore le mal. La porosité est loin d'augmenter la capacité d'emmagasinement des accumulateurs. Nous verrons ultérieurement qu'on doit, au contraire, chercher à diminuer la porosité de la matière active.

En résumé, l'avantage de la formation rapide existe dans la pile Faure, mais celui de l'augmentation de puissance d'emmagasinement est nul.

Ce que nous nous plaisons à reconnaître, c'est que les premiers essais industriels des accumulateurs électriques ont été tentés par M. Faure. C'est certainement à cet électricien que l'on doit les premiers éclairages de lampes à arc voltaïque et à incandescence et les premières expériences de traction électrique réalisées au moyen d'accumulateurs.

Nous ne pouvons cependant nous empêcher d'exprimer nos regrets aussi vifs que sincères de ce que les sociétés qui avaient la propriété des accumulateurs Faure n'ont

pas su tirer de cet appareil tous les avantages dont il est susceptible. On a voulu faire une spéculation bien plus qu'une opération saine et sérieuse. On a montré des choses étonnantes, mais on n'a pas su comprendre que, dans l'industrie, les choses étonnantes ont surtout besoin d'être utiles et profitables. C'est ainsi que les accumulateurs électriques, après avoir été l'objet de l'engouement général, ont été fortement discrédités dans ces derniers temps. Enfin, au lieu d'avoir servi la cause de l'électricité, on peut dire que ces sociétés ont retardé de plusieurs années un grand nombre d'applications des accumulateurs.

Il est incontestable que depuis que l'accumulateur à base de plomb et à dépôt de matières actives a vu le jour, certains électriciens sont parvenus à des résultats bien plus sérieux que ceux qu'avait obtenus M. Faure. Nous aurons tantôt l'occasion d'en parler.

Il ne sera pas sans intérêt, croyons-nous, de rappeler les réponses que firent sir William Thomson, membre de la Société royale de Londres et de l'Institut de France, et M. Bottombey, membre de la Société royale d'Édimbourg, à une série de questions qui leur furent adressées par le conseil d'administration de la Société belge « *La force et la lumière* », propriétaire des brevets Faure :

« 1re QUESTION. Quelle perte a été constatée par le passage de l'électricité à travers les accumulateurs?

« RÉPONSE. Cette perte est en rapport avec la rapidité avec laquelle on charge et on décharge les batteries. Plus la rapidité est grande, dans un cas comme dans l'autre, plus cette

perte est grande. Dans de bonnes conditions pratiques, la perte ne doit pas dépasser 10 p. c. à la charge et 15 p. c. à la décharge. Dans un certain nombre de cas, il pourra être utile de tolérer une perte plus grande, en tenant compte de la dimension et du nombre des accumulateurs. »

Ces résultats sont aussi bien applicables à tous les accumulateurs à base de plomb qu'aux accumulateurs Faure.

« 2e QUESTION. Combien d'énergie électrique peut-on emmagasiner dans 50 éléments renfermant ensemble une tonne de plomb et de minium dans les proportions voulues et parfaitement bien fabriquées?

« RÉPONSE. Si chaque élément est aussi bien fabriqué et aussi bon que celui marqué « A » dans nos expériences des 12 et 13 août, la quantité d'énergie emmagasinée dans 50 éléments contenant chacun 20 kilogs de plomb et minium pleinement chargés d'électricité, serait d'un peu plus de 20 chevaux-heures, sur lesquels 16 chevaux-heures seraient utilisables dans de bonnes conditions et pourraient reproduire en force motrice la valeur de 12 ou 15 chevaux-heures effectifs. Au moyen d'une machine dynamo marchant pendant deux ou trois heures, on obtiendrait probablement de ces 50 éléments un rendement de 6 chevaux pendant deux heures, ou 3 $\frac{1}{4}$ chevaux pendant quatre heures. »

Si ces résultats s'étaient réalisés, il faudrait convenir que les accumulateurs auraient joué dans toutes ses applications un rôle parfaitement économique. Disons toutefois que jusqu'ici on n'est jamais parvenu à emmagasiner dans une tonne d'accumulateur Faure 20 chevaux-heures, ce qui ferait 50$^{k.}$ pour un cheval-heure.

« 3e QUESTION. Quelle est la différence, au point de vue du

pouvoir d'accumulation, entre une batterie Planté, après trois mois de travail de formation, et une batterie Faure ayant seulement huit jours de formation, à poids égal?

« Réponse. Le seul élément Planté sur lequel j'ai expérimenté a été, je crois, acheté chez le fabricant autorisé à le vendre; il est à tel point inférieur à la batterie Faure, qu'il ne peut lui être comparé en aucune façon; il ne peut servir ni à l'éclairage, ni à la force motrice, tandis que la batterie Faure peut être pratiquement employée à ces usages. Pour donner les différences par des chiffres, il faudrait peser exactement le plomb qui se trouve dans la batterie Planté sur laquelle nous avons expérimenté et qui se trouve actuellement au n° 446, Strand, à Londres. »

Il y a beaucoup de choses à rabattre dans cette réponse.

Nous avons beaucoup expérimenté nos accumulateurs à fils, genre Planté. Il est incontestable qu'en donnant aux électrodes de Planté une épaisseur égale à la moitié du diamètre de nos fils, la puissance d'emmagasinement doit être la même dans les deux cas. Or, nous avons maintes fois constaté qu'avant trois mois de formation, 1 kilog. d'électrode était capable d'emmagasiner près de 10 000 coulombs. Avec 16 éléments chargés, pesant chacun 2 kilos, ce qui donnait à la batterie un poids total de 32 kilos, nous avons parfaitement éclairé pendant plus de quatre heures une lampe Swam de 28 volts et de $1^{amp.},38$, ce qui montre clairement que la pile Planté peut être appliquée aussi bien que la pile Faure à l'éclairage. Il en serait de même pour la force motrice.

J'admets, et je l'ai déjà dit antérieurement, qu'au bout de quelques semaines l'élément Faure est un peu

plus puissant que celui de Planté. Mais on sait aussi que cette augmentation n'est qu'éphémère, puisqu'après quelques mois de service continu, l'appareil ne fonctionne plus.

« 4e QUESTION. Y a-t-il des raisons de croire que les batteries Faure dureront moins longtemps que les batteries Planté, dont quelques-unes ont déjà subi une épreuve de 15 années?

« RÉPONSE. Non, je ne le pense pas; je pense, au contraire, que la batterie Faure est plus durable que celle de M. Planté, car le feutre offre dans la première une protection certaine contre la chute du peroxyde de plomb, si fragile, qui se forme sur les plaques; mais quant à la durabilité du feutre plongé dans l'eau acidulée, cela reste à démontrer par l'expérience d'année en année. »

Il n'a malheureusement pas fallu bien longtemps pour montrer dans quelle erreur sont tombés les deux éminents physiciens qui ont été les conseils de la Société « *La force et la lumière* ». Ce n'est pas par le feutre que l'appareil a péri, mais bien, comme nous l'avons vu ci-dessus, par les réactions chimiques elles-mêmes qui se passent au sein des électrodes.

Disons encore, pour terminer, qu'à l'origine, M. Reynier assigna aux accumulateurs Faure une puissance d'emmagasinement 40 fois supérieure à celle des éléments Planté. Le chiffre de 40 fut bientôt réduit par M. Hospitalier à 2 seulement, et depuis lors l'expérience a prouvé qu'un accumulateur Planté exceptionnellement bien formé peut parfaitement rivaliser avec un accumulateur Faure. De plus, il aura sur celui-ci l'avantage d'une longue durée.

§ 6.

ACCUMULATEUR VOLCKMAR.

Comme la matière active ne présentait pas, dans les accumulateurs Faure, l'adhérence nécessaire pour l'empêcher de s'écailler et de se détacher de son support, certains électriciens ont repris le problème que s'était posé M. Faure. En travaillant dans le but d'arriver à une bonne solution de ce problème, il y en a, comme M. Volckmar, qui sont arrivés à augmenter réellement la puissance d'emmagasinement de l'accumulateur.

Dans un brevet d'importation pris le 10 octobre 1881, en Belgique, M. Volckmar revendique, comme son invention, le système caractérisé par :

« 1° L'établissement de cellules nombreuses et très rapprochées, ou évidements, permettant de maintenir et de conserver, sans le secours d'aucun vase poreux, le plomb peroxydé et réduit, amené à cet état par la formation résultant d'un courant électrique ;

« 2° L'emploi du plomb divisé mécaniquement ou chimiquement (de préférence plomb pur) pour garnir ces cellules exclusivement à l'intérieur. »

A notre avis, l'accumulateur Volckmar réalisait un progrès bien plus sérieux que celui qu'avait obtenu M. Faure.

Nous avons vu que, d'après ce dernier, il n'y a guère qu'un demi-millimètre de la matière active qui travaille

d'une façon utile. Or, si, comme M. Volckmar le fait, cette matière active est enfermée dans de petites cellules très rapprochées, à l'instar des carrés d'une gaufre, n'est-il pas clair que de cette manière il proportionne plus facilement la quantité d'oxyde plombique à la surface conductrice de l'électrode.

Il y a lieu de remarquer que même dans les éléments fabriqués acuellement, l'épaisseur de la couche d'oxyde est encore trop épaisse eu égard à la surface active de l'électrode.

A quoi sert d'avoir une forte épaisseur de minium appliquée sur un support, si une grande partie de ce minium ne fonctionne pas. C'est évidemment un poids mort qu'il faut absolument faire disparaître.

Si la capacité d'emmagasinement est réellement accrue dans l'accumulateur Volckmar, il n'en est pas moins vrai que cet électricien n'a pas su résoudre le problème d'une façon complète. En effet, le défaut de la durée constatée pour l'accumulateur Faure subsiste encore ici. Il ne suffit pas d'englober l'oxyde dans des cellules, il faut encore le fixer au support, de telle sorte que le support ne serve que de conducteur électrique, et qu'il ne subisse pas les actions chimiques qui se produisent au sein de l'élément.

En un mot, M. Volckmar s'est contenté de rechercher un système « permettant de maintenir et de conserver sans le secours d'aucun vase poreux le plomb peroxydé et réduit. »

Il eut dû se préoccuper davantage 1° de la proportion

à établir entre la quantité d'oxyde et la surface conductrice de l'électrode, et 2° de la fixation de la matière active sur le support.

Le premier de ces points eût permis d'obtenir une plus grande capacité d'emmagasinement pour un poids donné d'électrode, et le second de donner à ces éléments une durée supérieure à celle des accumulateurs Faure.

§ 7.

ACCUMULATEUR HOUSTON ET THOMSON.

Cet accumulateur ne peut guère être considéré comme un appareil industriel. Nous tenons cependant à le mentionner, car le principe sur lequel il repose est essentiellement nouveau. Le phénomène secondaire résulte, en effet, de la décomposition d'une dissolution saline, le sulfate de zinc, dans le cas particulier de la batterie d'emmagasinement de MM. Houston et Thomson, combinée en octobre 1879.

Les deux électrodes sont constituées par une plaque de cuivre et une plaque de charbon, plongeant dans une solution de sulfate de zinc, et séparées l'une de l'autre par un diaphragme poreux.

Sous l'action d'un courant primaire, le sulfate de zinc se décompose, en déposant du zinc métallique sur la plaque de charbon et en produisant une solution de sulfate de cuivre.

L'électrolyse n'a donc pour effet que de produire un véritable couple de Daniell. Cet accumulateur constitue, comme on l'a très bien dit, *un élément-gravité,* analogue à l'élément Callaud.

Aussi longtemps qu'il existe un dépôt de zinc sur la plaque de charbon, le courant secondaire persiste, et la durée de la charge dépend, d'une part, de la quantité

de sulfate de zinc renfermé dans le vase, et d'autre part, de l'épaisseur de la plaque de cuivre.

Cet appareil étant plus théorique que pratique, ne reçut aucune application.

§ 8.

ACCUMULATEUR D'ARSONVAL.

Le 26 janvier 1880, M. d'Arsonval donnait à l'Académie des sciences de Paris la description de son accumulateur, qu'il désignait sous le nom de *condensateur voltaïque.*

« J'ai eu l'idée, disait M. d'Arsonval, de remplacer le dégagement de l'hydrogène, *métal gazeux,* par un dégagement de zinc, *métal solide.* Ce n'est plus l'eau que j'électrolyse, mais bien un sel de zinc. D'un autre côté, j'ai considérablement augmenté la surface du plomb offerte à l'oxydation en remplaçant la lame unique par une lame de charbon entourée de grenaille de plomb très fine. La surface de plomb devient énorme si l'on prend ces grains de plomb très fins, désignés dans le commerce sous le nom de *cendrée.* Mon couple secondaire se compose donc d'une lame de zinc et d'une lame de charbon entourée de cendrée plongeant dans une solution concentrée de sulfate de zinc. Si un couple ainsi construit est traversé par un courant voltaïque allant du charbon au zinc, le sel de zinc se trouve électrolysé, le zinc se dépose sur le zinc, et l'oxygène vient former sur le plomb du peroxyde de plomb, l'acide sulfurique restant à l'état libre. Le dépôt du métal oxydable ne se trouve plus limité et l'oxygène peut être accumulé en beaucoup plus grande quantité. ..... Dans la pratique, j'ai remplacé avantageusement la lame de zinc par une couche de mercure qui forme un amalgame avec le zinc électrolysé.

« Le plomb n'est pas le seul métal qui puisse servir avantageusement à emmagasiner l'oxygène; le manganèse produit

le même résultat; c'est même un excellent moyen de recharger les couples Leclanché épuisés. »

« Je citerai aussi l'argent qui, en présence du chlorure de zinc, donne un dépôt de chlorure d'argent. ..... »

Le principe de cet accumulateur est excellent. Il suffit, pour s'en convaincre, de se rappeler ce que nous avons dit aux articles relatifs *à la polarisation des accumulateurs* et à la recherche de l'*accumulateur capable de donner la force électro-motrice maxima ;* mais il possède un défaut capital sur lequel nous croyons devoir nous étendre quelque peu.

Lorsqu'on plonge une lame de zinc ordinaire dans l'eau acidulée sulfurique, tout le monde sait qu'il se produit une attaque du métal assez prononcée. Le métal finit même par se dissoudre complètement dans le liquide qui devient ainsi une véritable solution de sulfate de zinc acidulée.

Évidemment, dans un accumulateur au zinc, si l'électrode négative est constituée par une lame de zinc, le même phénomène se présentera, et il arrivera qu'au bout d'un certain temps, l'électrode négative sera entièrement dissoute dans le bain.

Est-il nécessaire d'insister sur cet inconvénient, et ne comprend-on pas facilement que la durée trop limitée d'un tel accumulateur doive l'écarter dans les applications industrielles.

C'est sans doute dans le but de réduire l'attaque locale du zinc que M. d'Arsonval l'amalgame au moyen d'une couche de mercure. Mais si cet amalgame remplace

avantageusement la lame primitive, il n'en est pas moins vrai que l'attaque ne disparaît pas complètement. On prolongera simplement la durée de cette électrode qui devra toujours finir par disparaître dans le liquide.

Pendant l'année 1883, l'attention des spécialistes fut attirée sur un alliage des zincs par une note que fit paraître M. Reynier dans *l'Électricien du 1er octobre, « sur l'attaque locale des zincs en circuit ouvert. »* Cet article est très intéressant : nous en reproduirons l'extrait suivant :

« L'attaque locale des zincs par les liqueurs acides ou cuivriques est un obstacle à l'emploi des couples énergiques, elle augmente beaucoup leur dépense pendant le travail et les épuise, même à circuit ouvert. C'est donc travailler à l'amélioration des piles que d'étudier les moyens d'empêcher, d'atténuer au moins, les réactions inopportunes du zinc sur les liquides qui les baignent.

« Les procédés les plus efficaces et les plus connus sont l'emploi du zinc pur qui est peu pratique, et l'amalgamation de l'électrode, opération désagréable et coûteuse qu'il faut renouveler souvent. »

. . . . . .

« Les amalgames de zinc, liquides ou pâteux, sont incommodes et fort coûteux; pourtant on les a parfois recommandés comme économiques, parce qu'ils permettent d'utiliser les rognures de zinc : singulière économie qui consiste à mettre en manipulation plusieurs kilos de mercure à 5 francs pour tirer parti d'un kilo de débris à 40 centimes!

« Il m'est revenu que Leclanché avait tenté, autrefois, l'emploi des alliages solides de zinc et de mercure. On ne sait pas s'il a réussi à les fabriquer à bas prix; rien ne témoigne

qu'il en ait pratiqué ou proposé l'usage. .... Aucun des inventeurs et des auteurs qui ont travaillé ou écrit sur les piles n'ont donné sur l'usure locale des zincs diversement préparés, baignés dans diverses liqueurs, des chiffres d'expérience comparatifs. Il m'a paru utile de traiter cette question. »

M. Reynier indique ensuite la manière dont les expériences ont été conduites sur des zincs nus, des zincs amalgamés et des alliages solides de zinc et de mercure, et donne un tableau résumant les principaux résultats obtenus. Nous croyons devoir reproduire ce tableau, afin que l'on puisse bien se rendre compte des conséquences que nous déduirons plus tard.

RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES

FAITES POUR APPRÉCIER L'IMPORTANCE DE L'ATTAQUE LOCALE DES ZINCS DIVERSEMENT PRÉPARÉS, IMMERGÉS DANS DIVERSES LIQUEURS.

COMPOSITION DES LIQUEURS.	DURÉE DES EXPÉRIENCES.	USURE MOYENNE EN MILLIGRAMMES PAR HEURE ET PAR CENTIMÈTRE CARRÉ.		
	heures.	nu.	amalg.	allié.
Eau. . . . . en volume 900	1	990	»	»
Acide sulfurique ordinaire à 66 degrés. — 100	72	»	18	2,2
Eau. . . . . en volume 900	1	639	»	»
Acide sulfurique au soufre, 66 degrés. — 100	96	»	0,09	0,1
Eau. . . . . en volume 900	1	78	»	»
Acide sulf. ordinaire, préparé à l'huile par le procédé de	3	307	»	»
M. d'Arsonval . . — 100	72	»	0,2	0,27
Eau. . . . . en volume 900	1	1265	»	»
Acide sulf. ordinaire, 66 degrés . . . . — 100	24	»	4	2,7
Nitrate de soude, gramm. par lit. 10	48	»	24	8.7
Eau. . . . . en volume 900	21	67	0,14	0,76
Acide sulf. ordinaire,	93	»	0,71	0,62
66 degrés . . . . — 100	237	»	0,61	0,46
Sulfate d'amm., grammes par lit. 50	434	»	0,55	0,40

COMPOSITION DES LIQUEURS.	DURÉE DES EXPÉRIENCES.	USURE MOYENNE EN MILLIGRAMMES PAR HEURE ET PAR CENTIMÈTRE CARRÉ.		
	heures.	nu.	amalg.	allié.
Eau. . . . . en poids 1000	24	28	»	»
Bisulfate de potasse. — 100	72	»	0,09	0,04
Eau. . . . . en poids 1000				
Bisulfate de potasse. — 100	24	21,7	inappréciable.	inappréciable.
Sulf. d'ammoniaque. — 50	72	»		
Eau. . . . . en volume 900				
Acide sulf. ordinaire,				
66 degrés. . . . . — 100	1	1566	1415	»
Sulf. de cuivre, en gramm. par lit. 50	1,30′	»	»	798
Eau. . . . . en poids 1000	24	39	15	19
Sulfate de cuivre. . — 150	48	»	26	28
Eau. . . . . en poids 1250	0,30′	2603	»	»
Bichromate de potasse. — 200	1,30′	»	664	»
Acide sulf. ordinaire,				
66 degrés. . . . . — 470	3	»	»	445
Acide chlorhydrique du commerce.	0,15′	6555	»	»
	24	»	61	11
Eau. . . . . en volume 800	1	1519	»	»
Acide chlorhydrique				
du commerce. . . — 200	72	»	0,87	0,3

Nous dirons avec M. Reynier que l'ensemble de ces expériences démontre que les *alliages zinc et mercure* doivent être généralement préférés au zinc ordinaire et

même au zinc amalgamé, et que leur emploi contribue à l'économie des couples et atténue leur inconstance; mais remplissent-ils toutes les conditions que l'on est en droit d'exiger de leur emploi dans les accumulateurs industriels?

C'est ce que nous allons examiner.

Rappelons d'abord la différence qui existe entre une pile primaire et un accumulateur électrique. Dans une pile primaire, il y a toujours une électrode *soluble*, comme disent les électriciens, et c'est précisément la propriété de se laisser attaquer, de se laisser dissoudre qui est la cause de la production du courant électrique. Or, lorsque cette électrode est entièrement dissoute, l'appareil ne fonctionne plus; la pile est épuisée; elle n'existe plus.

Dans un accumulateur, au contraire, il faut, pour que l'appareil soit industriel, qu'avant tout il soit régénérable; que, malgré les charges et les décharges successives, les électrodes soient toujours ramenées au même état physique.

En d'autres termes, si l'une des électrodes peut se dissoudre dans le liquide, l'appareil ne constitue pas un accumulateur vraiment industriel.

En considérant les résultats du tableau ci-dessus, on remarque que dans les trois cas : zinc nu, zinc amalgamé, zinc allié, l'attaque du métal est réelle et se fait sentir d'une façon appréciable au bout d'une centaine d'heures d'expériences. L'usure est tellement forte avec le zinc nu que nous dirons immédiatement qu'il faut

l'écarter d'une façon rigoureuse dans les accumulateurs électriques.

Quant au zinc amalgamé, nous ferons remarquer que les résultats du tableau sont très encourageants; mais n'oublions pas que lorsqu'on amalgame une lame ou un cylindre de zinc, c'est surtout à la surface du métal que se fixe le mercure; comme dit très bien M. Reynier, « sur le zinc amalgamé, la première couche superficielle est riche en mercure; mais à mesure que l'attaque gagne des couches plus profondes, la proportion de mercure diminue et aussi la protection obtenue. » La conclusion toute simple, c'est que si l'on prolonge l'expérience pendant quelques jours, il arrive un moment où le zinc a perdu tout son mercure; il se trouve alors dans le même état que le zinc nu; l'avantage de l'amalgame disparaît trop vite; c'est pourquoi nous sommes d'avis qu'il ne peut être utilement employé dans les applications de l'industrie.

En ce qui concerne le zinc allié, il est clair que si la quantité de mercure reste la même, alors que le poids de zinc diminue, ce qui reste cependant à vérifier, l'alliage du zinc mercure sera plus avantageux que le zinc amalgamé. Mais il est nécessaire que cet alliage forme une masse absolument homogène; il faut que le mercure soit réparti uniformément dans toute la masse du zinc, sinon il y aurait certaines parties qui seraient plus attaquées que d'autres; est-on parvenu par les procédés actuels de fabrication à réaliser ce desideratum? Nous l'ignorons, mais nous le souhaitons

sincèrement, et si la chose n'est pas encore obtenue, comme elle ne doit pas être impossible, nous espérons que les spécialistes résoudront bientôt cette question.

Toutefois y a-t-il lieu de dire que les zincs alliés pourront servir d'électrodes dans les accumulateurs électriques? Nous n'hésitons pas à répondre catégoriquement : non; *à moins que l'on ne parvienne à trouver un alliage qui rende absolument nulle l'attaque du zinc en circuit ouvert.*

Dans l'état actuel de la question, cette attaque locale subsiste malgré l'amalgame et malgré l'alliage. Or, si au bout de plusieurs mois, l'électrode zinc peut se dissoudre en totalité dans le liquide, il est évident que la batterie sera à renouveler. Interrogez l'industriel qui doit faire usage d'une semblable batterie et que l'on prenne soin de lui dire que dans deux ou trois mois, il devra acheter une nouvelle batterie, renouveler du moins toutes les électrodes zinc. Il est évident que cet industriel dira que, dans ces conditions, il préfère s'en passer.

Pour qu'un appareil puisse rendre de véritables services dans l'industrie, il faut que son entretien soit minime et que sa durée permette d'obtenir un taux d'amortissement raisonnable.

C'est ce qui n'a pas lieu avec l'accumulateur au zinc; aussi j'estime que le zinc ne pourra être utilement employé comme électrode négative des accumulateurs électriques, que le jour où l'on sera parvenu *à annuler complètement* son attaque en circuit ouvert.

C'est en nous pénétrant de cette idée que nous avons remplacé cette électrode métallique en zinc par une lame de charbon qui remplissait absolument le même but. Sous l'action du courant primaire, le sel de zinc se décompose, en produisant un dépôt de zinc sur la lame de charbon, tandis que l'oxygène forme sur le plomb du peroxyde de plomb.

Supposons que l'on fasse traverser cet accumulateur par un courant primaire pendant une heure ; au moment où l'on rompt le circuit, on constate qu'il existe sur la lame de charbon un dépôt de zinc d'une certaine épaisseur. Si on laisse plonger cette lame dans le liquide, on observe immédiatement que cette couche de zinc se dissout, de sorte que si l'action dissolvante peut se produire durant quelque temps, tout le dépôt disparaît. Il semblerait que le métal étant déposé électrolitiquement soit absolument pur, et partant, ne puisse donner lieu à dissolution. J'ai fait un grand nombre d'expériences sur ces accumulateurs et l'observation m'a toujours montré une dissolution. Lorsque le dépôt de zinc est dissout, l'accumulateur ne donne plus de courant secondaire, puisque celui-ci est engendré par les actions simultanées d'oxydation du zinc et de réduction de peroxyde de plomb, et qu'il n'existe plus de zinc. Pour tirer parti de la charge d'un tel accumulateur, il faut donc s'en servir immédiatement après la rupture du courant primaire. Le seul avantage de ce système, c'est donc de conserver toujours intacte l'électrode négative.

Dans l'accumulateur d'Arsonval, on a la ressource de

se servir, pour l'oxydation du zinc, du métal même de l'électrode, mais ce procédé a également pour effet de hâter la mise hors d'usage de cet accumulateur.

Au lieu d'employer notre lame en charbon, M. Reynier se sert d'une feuille de plomb qui est zinguée par l'électrolyse du liquide.

Le même inconvénient que dans notre système, où nous nous servons d'une lame de charbon, se produit évidemment ici.

En résumé, malgré les très grands avantages que présentent les accumulateurs au zinc (on verra ultérieurement que, d'après la théorie, il est, à puissance égale, le plus léger de tous les systèmes connus), nous pensons que, dans les applications industrielles, ils ne pourront que dans des cas exceptionnels, lutter avec avantage contre les accumulateurs à base de plomb.

Nous avons cru utile de nous étendre assez longuement sur les accumulateurs au zinc, car depuis quelque temps il semble entrer dans l'esprit des électriciens que ce genre d'appareils est appelé à détrôner la grande invention de Planté.

Nous sommes les premiers à leur attribuer un certain mérite, mais les considérations que nous avons développées réduisent à leur juste valeur l'importance qu'il y a lieu de leur accorder.

Il est assez intéressant de montrer dans quel but MM. d'Arsonval et Reynier ont voulu remplacer l'accumulateur Planté par un accumulateur au zinc. Écoutons les intéressés :

« En voyant les effets énergiques, mais très courts, dit M. d'Arsonval, développés par les piles secondaires et principalement par la batterie de M. Gaston Planté, je me suis demandé s'il n'était pas possible d'obtenir un condensateur voltaïque pouvant emmagasiner une quantité d'électricité beaucoup plus grande. .... J'ai eu l'idée de remplacer le dégagement de l'hydrogène, *métal gazeux,* par un dégagement de zinc, métal solide. Ce n'est plus l'eau que j'électrolyse, mais bien un sel de zinc. .... »

D'autre part, M. Reynier s'exprime comme suit :

« Il me sembla que la combinaison d'un positif Planté avec un négatif *soluble,* tel que le cuivre et le zinc, présentait des avantages importants.

« En premier lieu, la formation Planté, délicate et longue, se trouve simplifiée et raccourcie de beaucoup; car le négatif se forme d'emblée, et l'on n'a plus à pratiquer lentement, méthodiquement, ce travail de Pénélope qui consiste à réduire et oxyder un grand nombre de fois ce qu'on a oxydé et réduit. L'accumulateur au cuivre ou au zinc peut être formé sans retournement, par charges et décharges successives de durées croissantes. *Pour le former, il suffit de s'en servir.* En second lieu, l'électrode négative n'a pas besoin de grande surface ou de porosité : c'est simplement une feuille lisse de plomb servant de support et de conducteur au dépôt électro-chimique de cuivre ou de zinc. »

Comme on le voit, ce ne sont pas des déductions théoriques qui ont amené MM. d'Arsonval et Reynier à réaliser cet appareil *qui possède la plus grande force électro-motrice* que l'on ait observée jusqu'ici dans les piles primaires et secondaires; ce ne sont pas non plus des considérations théoriques qui les ont

engagés à substituer à l'accumulateur Planté, appareil à polarisation sensible, un nouvel accumulateur *où la polarisation est négligeable.*

M. d'Arsonval « *a eu l'idée* de remplacer le dégagement d'un métal gazeux par un dégagement de métal solide », sans se douter (il l'aurait certainement fait connaître à l'Académie, s'il en avait été autrement) que son condensateur voltaïque possédait ces deux qualités importantes : *force électro-motrice maxima et absence de polarisation.*

D'un autre côté, « *il a semblé* à M. Reynier que cette combinaison diminuerait d'une part la durée de formation de l'accumulateur et d'autre part permettrait d'utiliser des surfaces relativement minimes pour l'électrode négative »; mais, théoriquement parlant, il n'a pas plus prévu que M. d'Arsonval les deux avantages que nous venons de citer.

Ces rapprochements sont intéressants en ce sens qu'ils montrent d'une façon remarquablle que la théorie peut beaucoup dans les applications de l'industrie, quand elle est raisonnée d'une façon sérieuse.

Il était utile de s'appesantir sur ces considérations générales qui permettront souvent d'éviter des pertes de temps à ceux qui veulent essayer telle ou telle combinaison. Dans ces derniers temps, ces essais ont été entrepris d'une façon absolument inintelligente, qu'on ne saurait trop blâmer. Si nous avons besoin de certains secours, ce n'est pas au hasard qu'il faut les demander, mais bien à la vraie science et aux connaissances théoriques.

Si nous reprenons l'accumulateur de M. d'Arsonval tel qu'il a été décrit ci-dessus, il nous reste à dire que, pour un usage de longue durée, la grenaille de plomb ne peut guère convenir.

En effet, nous avons constaté que, par l'usage, la matière active qui recouvrait chaque grain de plomb finissait par devenir inerte, le conducteur électrique ne reliant plus ces grains les uns aux autres comme dans les premiers temps. Alors l'accumulateur ne donne pas plus d'effet que si les grains étaient recouverts de farine, comme le disait très spirituellement M. Van Olande, un employé intelligent qui m'a souvent aidé dans la construction de mes appareils et qui, sans avoir connaissance du condensateur d'Arsonval, avait imaginé également une électrode à grenaille de plomb.

Quant à la lame de charbon qui plonge dans la grenaille de plomb, nous dirons qu'il serait plus rationnel de la remplacer par une simple lame de plomb. La résistance de l'élément serait moins grande de cette manière. De plus, une bonne attache du raccord à une lame de charbon est toujours chose très difficile ; nous reviendrons plus tard sur ce dernier point.

En ce qui concerne le remplacement du plomb par du manganèse, nous ne pouvons nous y rallier, car le peroxyde de manganèse n'a pas une aussi grande tendance que le peroxyde de plomb à décomposer l'eau acidulée en s'emparant de l'hydrogène.

Quant à l'argent, le degré de puissance des effets que l'on obtient n'est pas assez élevé pour compenser la valeur de ce métal.

§ 9.

ACCUMULATEUR SUTTON.

En 1881, l'attention des électriciens fut attirée sur un nouvel accumulateur par un article paru dans *Scientific notes*. Il s'agissait de l'accumulateur Sutton, reposant, comme celui d'Houston et Thomson, ainsi que celui de d'Arsonval, sur la décomposition d'une dissolution saline.

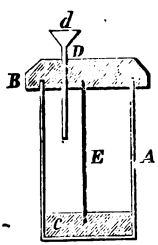

Fig. 18.

L'accumulateur que recommandait d'une façon plus spéciale M. Sutton, est représenté par la figure 18.

A est un récipient en cuivre poli au fond duquel repose une petite pièce de bois parafiné, *C*. Un couvercle, *B*, de la même matière, est percé d'une ouverture à travers laquelle passe un tube de verre qui sert à la fois à introduire le liquide dans le vase et à se rendre compte de l'état de la solution. Dans chacune des pièces de bois est pratiquée une rainure centrale qui reçoit une plaque de plomb amalgamée, *E*.

Dans le récipient on introduit une solution de sulfate de cuivre légèrement acidulée par l'acide sulfurique.

Faisons passer un courant primaire à travers cet appareil ; voici les réactions chimiques qui y prennent naissance :

Le sulfate de cuivre se décompose ; le cuivre se dépose

sur les parois du récipient, tandis que l'oxygène se portant sur le plomb, se combine avec celui-ci pour transformer la surface de cette électrode en peroxyde de plomb.

Pendant cette opération, on constate, grâce au tube en verre qu'on retire du récipient, en bouchant, au moyen du doigt, l'extrémité *d*, que la solution perd sa couleur bleue. Quand la charge est complète, c'est-à-dire quand tout le sulfate de cuivre est décomposé, le liquide est tout à fait incolore. On est ainsi prévenu quand l'opération de chargement est terminée.

Pendant la décharge, une opération inverse se produit; il y a formation de sulfate de cuivre et la solution redevient bleue.

Pour donner une idée de la puissance de cet accumulateur, il était dit dans l'article en question que « l'inventeur constata qu'un récipient de quatre pouces de profondeur, soit $0^{m}.,10$, sur quatre pouces de diamètre intérieur, donnait un courant qui, pendant deux heures, chauffait au rouge un pouce de fil d'archal (jauge n° 28). »

Un an plus tard on ne parlait plus de l'accumulateur Sutton.

Nous faisions, à cette époque, les expériences que nous avons rapportées ci-dessus en parlant de nos accumulateurs à fils. Comme nous l'avons dit plus haut, nous avions constaté que le cuivre, par le travail de l'accumulateur, finissait par se dissoudre dans la solution légèrement acidulée.

Nous présumons que les promoteurs de l'accumulateur Sutton auront trouvé, en Angleterre, le même défaut capital et que c'est le véritable motif qui aura fait abandonner cet appareil.

§ 10.

ACCUMULATEUR REYNIER.

M. Reynier s'est beaucoup occupé des accumulateurs électriques, et nous nous plaisons à reconnaître que les recherches qu'il a entreprises, surtout au point de vue de la construction industrielle de ce genre d'appareils, ont toujours été poursuivies avec beaucoup d'intelligence.

En février 1883, M. Reynier, voulant montrer à la municipalité de Nantua la possibilité d'une canalisation électrique en utilisant une chute d'eau, réalisa des

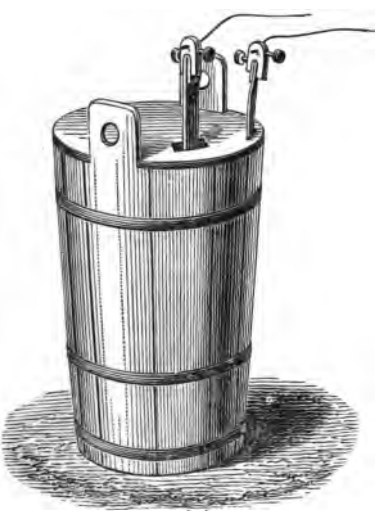

Fig. 19.

Fig. 20.

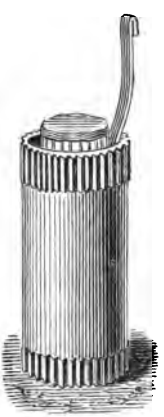

Fig. 21.

accumulateurs de la forme indiquée figures 19, 20 et 21. Voici la description que M. Reynier en a donnée dans son livre intitulé : *Piles électriques et accumulateurs, recherches techniques :*

« L'électrode positive (fig. 21) est une longue feuille de plomb, plissée et ajourée, puis roulée en forme de cylindre sur une carcasse centrale en bois; la négative est un cylindre lisse en plomb *cuivré* ou zingué, tapissant le récipient; elles sont portées sur un croisillon et séparées l'une de l'autre par une cage de bois ou d'osier (fig. 20). Le récipient est une benne en sapin, goudronnée a l'intérieur et solidement cerclée par des ceintures de cuivre.

« Le liquide est de l'eau acidulée sulfurique tenant en dissolution du sulfate de cuivre ou de zinc.

« Les surfaces actives sont 105 décimètres carrés pour l'électrode positive et 18 décimètres carrés pour la négative.

« La force électro-motrice est 1volt,2 pour l'accumulateur *au cuivre* et 2volts,3 pour l'accumulateur *au zinc :* celui-ci est donc beaucoup plus énergique que celui-là, mais son électrode négative est le siège d'une action locale parasite qui abaisse son rendement. »

Ce modèle qui avait dû être improvisé sur place, a maintenant disparu pour faire place au suivant.

« Le petit *accumulateur au cuivre* (fig. 22) a, comme électrode positive, une longue plaque de plomb mince, plissée et ajourée, soudée à sa partie supérieure dans une monture de laiton, laquelle est fixée sur une traverse en bois paraffiné.

« Les deux lames latérales négatives sont des feuilles de plomb lisses, cuivrées par l'électrolyse de la solution acidulée de sulfate de cuivre contenue dans le vase de verre; elles sont reliées entre elles en dehors du liquide. Un couvercle

de bois soutient les trois électrodes, dont les extrémités inférieures s'arrêtent à plusieurs centimètres au-dessus du fond du vase. »

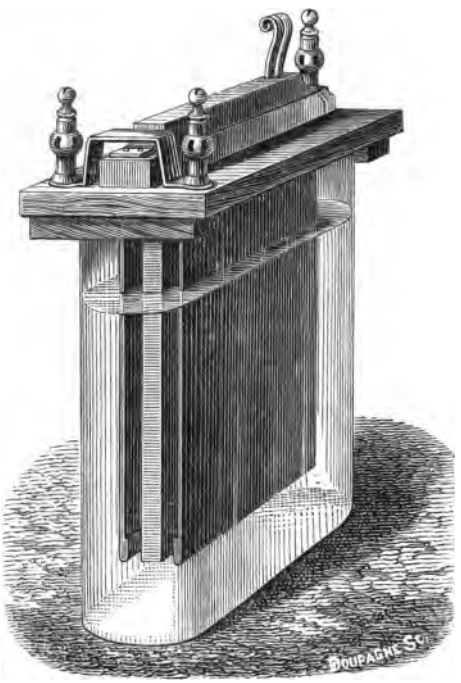

Fig. 22.

En remplaçant le sulfate de cuivre par le sulfate de zinc, on obtient l'*accumulateur Reynier au zinc*.

Ce dispositif est bien conçu. Par suite du travail de la pile, il y a toujours une certaine quantité de matières qui tombent au fond du vase, et comme les électrodes sont écartées de ce fond, il s'ensuit que l'on n'a pas à

craindre des dérivations qui résulteraient du contact des électrodes avec les fragments de matière tombée.

Comme on l'a vu dans la description donnée par M. Reynier, l'électrode négative n'est autre chose qu'une feuille de plomb cuivrée par l'électrolyse de la solution. Ce système n'est pas exempt d'un défaut que nous avons constaté, il y a environ deux ans, avec un accumulateur dont les éléments étaient identiques à ceux de l'appareil de M. Reynier.

Après quelques mois de fonctionnement de l'accumulateur, nous avons observé qu'à un ou deux centimètres au-dessus du liquide, le plomb s'attaquait à un tel point que des trous se formaient à cet endroit et qu'au bout de quelques jours il y avait séparation complète entre la partie immergée et la partie non plongée dans le liquide.

Ce phénomène résultait sans doute de la production d'un couple local qui se produirait immédiatement au-dessus de la surface liquide.

Ce qui nous autorise à admettre cette manière de voir, c'est que si l'on se reporte à la page 66, on reconnaît que, dans un couple dont les électrodes sont l'une en plomb et l'autre en cuivre, le métal attaqué est le plomb.

C'est le motif pour lequel nous avons abandonné ce genre d'accumulateur.

Quant à l'accumulateur au zinc, nous en avons donné notre appréciation en étudiant l'accumulateur d'Arsonval.

M. Reynier a fourni des données intéressantes sur ces divers types ; nous allons les reproduire.

Voici d'abord le type représenté par la figure 22 :

Longueur	0,205.
Largeur.	0,105.
Hauteur totale.	0,310.
Poids total	7 kilos.

DONNÉES PHYSIQUES.

Force électro-motrice,	1volt,26 (cuivre) et 2volts,37 (zinc).
Résistance moyenne.	0ohm,06 environ.
Intensité normale du court de décharge.	5 à 7 ampères.
Intensité du courant de charge. . . .	1 à 3 ampères.
Capacité d'accumulation :	
Après 100 heures de formation . . .	100 000 coulombs.
Après 200 » » » . . .	150 000 »

DONNÉES DE CONSTRUCTION.

Surface de l'électrode positive . . .	60 d. q.
» des électrodes négatives . .	5 d. q.
Poids de l'électrode positive. . . .	2k.,200.
» des électrodes négatives . . .	0k.,740.
» du récipient	1k.,600.
» du liquide	2k..
» du couvercle	0k.,200.
» des bornes et communication .	0k.,250.
» total	7 kilos.

M. Reynier a également réalisé des accumulateurs, *genre Planté,* dans lesquels les électrodes négatives de la figure 22 étaient remplacées par deux électrodes en plomb en tous points semblables à l'électrode positive.

Le liquide contenu dans le vase était alors de l'eau acidulée sulfurique.

Voici les renseignements numériques qu'il donne sur cet accumulateur :

DONNÉES PHYSIQUES.

Force électro-motrice pend^t la décharge.	1^volt,85.
Résistance moyenne.	0^ohm,04.
Intensité normale du cour^t de décharge.	7 à 8 ampères.
Intensité du courant de charge. . . .	1 à 5 ampères.
Capacité d'accumulation :	
Après 300 heures de formation . . .	100 000 coulombs.
Après 500 » » » . . .	150 000 »

DONNÉES DE CONSTRUCTION.

Surface de l'électrode positive . . .	60 d. q.
» des électrodes négatives . .	120 d. q.
Poids de l'électrode positive. . . .	2^k.,100.
» des électrodes négatives. . .	4^k.,200.
» du récipient	1^k.,600.
» du liquide	1^k.,800.
» du couvercle	0^k.,200.
» des bornes et des communicat^s.	0^k.,150.
» total	10 kilos.

Nous croyons que le débit normal du courant de décharge est exagéré pour les éléments genre Planté; il ne faut guère dépasser 0^amp.,75 par kilo d'électrode, ce qui ferait pour 6^k.,300 environ 4^a.,5.

Dans son modèle industriel, d'un poids de 17^k.,5, M. Reynier remplace le vase en verre par un récipient constitué par deux caisses parallélipipédiques en bois, l'une enveloppant l'autre, avec un jeu de plusieurs

millimètres. Cet intervalle est rempli d'un mastic à base de bitume. Ce récipient est peut-être excellent, mais il doit, dans tous les cas, coûter plus cher que la caisse en bois avec revêtement intérieur en plomb qui lui est également supérieure pour prévenir les fuites.

Nous n'avons qu'une seule observation à formuler au sujet de l'électrode positive. N'est-il pas à craindre que l'inconvénient que nous avons signalé pour l'accumulateur de Kabbath, se présente également ici? Par suite du gauchissement et de l'augmentation de volume qui se produisent sous l'influence du travail de l'accumulateur, les parties pliées n'arriveront-elles pas au contact? S'il en est ainsi, la surface active de cette électrode sera considérablement réduite et par conséquent l'avantage de la grande surface obtenue sous un faible poids diminuera proportionnellement.

§ 11.

ACCUMULATEUR A PLAQUES AGGLOMÉRÉES.

C'est en nous inspirant des considérations que nous avons développées dans la description des accumulateurs qui précèdent et des observations mentionnées plus loin, que nous avons réalisé notre accumulateur à plaques agglomérées.

Ce que nous avons surtout voulu réaliser, c'est un accumulateur n'exigeant qu'une durée de formation très réduite, possédant une grande capacité d'emmagasinement et ayant une durée pratiquement acceptable.

Résumons les avantages et les inconvénients des accumulateurs ci-dessus décrits ; nous parviendrons peut-être de cette manière et en tenant compte des observations qu'on lira tantôt, à combiner un appareil aussi parfait que possible dans l'état actuel de nos connaissances électriques.

Les accumulateurs à base de plomb et à dépôt naturel de matière active, genre Planté et ses dérivés, ont le grand avantage de durer un très grand nombre d'années. La limite ne peut être fixée d'une façon rigoureuse ; elle dépend essentiellement de l'épaisseur donnée au métal de l'électrode. Planté possède des couples qui ont travaillé pendant plus de vingt ans et qui sont aujourd'hui dans un meilleur état que pendant les premières années de leur fonctionnement. Cette durée peut

donc être parfaitement admise pour tous les appareils de ce genre et répond entièrement, et même davantage, à ce que l'on est en droit d'attendre d'un appareil industriel.

D'un autre côté, ces accumulateurs ont l'immense inconvénient de devoir être soumis à une opération très prolongée avant de donner des effets assez énergiques pour pouvoir être utilisés dans les applications industrielles.

Ce n'est guère qu'après une formation de 500 heures qu'on peut seulement commencer à les employer dans la majeure partie des applications. Or, si l'on ne dispose pas d'une force motrice absolument gratuite pour charger l'accumulateur pendant sa formation, on conçoit que cette opération désespérante est excessivement coûteuse.

Quant à la capacité d'emmagasinement, comme celle-ci dépend du degré de formation des couples, et comme cette formation est extraordinairement lente, il s'ensuit que ce n'est qu'à la longue qu'on obtiendra un accumulateur puissant.

Sans doute, Planté avait raison lorsqu'il disait que la capacité était liée à l'épaisseur des matières actives formées sur les supports, peroxyde de plomb, d'une part, et plomb réduit, d'autre part. Mais pour que ce principe fût vrai, il fallait que l'épaisseur de la matière active ne fût pas trop grande. Il y avait une certaine proportion à établir entre l'épaisseur et la surface de l'élément conducteur formant support. Est-ce trois,

quatre ou cinq dixièmes de millimètre qu'il faut avoir comme épaisseur du peroxyde? Je l'ignore et je ne sache pas qu'il ait jamais été fait des expériences à l'effet de savoir à combien de coulombs correspondait, par exemple, une épaisseur de 1 millimètre, de 2, 3, 4, 5 dixièmes de millimètre de matière active. Ces expériences seraient non seulement intéressantes, mais excessivement utiles. J'en ai commencé une série que je me propose de poursuivre et de publier lorsqu'elles seront complètes.

En outre, il y a lieu de remarquer que, quoique la texture cristalline du peroxyde brun de plomb lui assure une certaine adhérence, il arrive fréquemment que des particules, des fragments de peroxyde se détachent de l'électrode. En suppposant que l'appareil soit bien formé, il est évident que la chute de ces fragments nécessitera une formation nouvelle pour obtenir la même capacité d'accumulation d'énergie électrique qu'avant la chute de ces particules. Sans doute, lorsque la formation a été faite avec grand soin, la matière active possède une adhérence qu'on a pris l'habitude de regarder comme considérable; mais j'ai souvent constaté que, malgré les grandes précautions que l'on prenait pour former les accumulateurs, cette adhérence était loin d'être rigoureusement parfaite. J'attribue ceci à l'augmentation de volume que subit le peroxyde par la transformation du métal de l'électrode. On observe parfois qu'indépendamment de ce gonflement, certains filaments cristallins se détachent partiellement de la

plaque et paraissent plantés dans la couche de peroxyde; puis au bout de deux ou trois jours, ces filaments se détachent complètement en enlevant des brins de matière active qui tombent au fond du vase.

Lorsque les accumulateurs doivent souvent être remués, la chute de ces fragments est surtout considérable.

En résumé, et c'est le principal motif pour lequel je n'ai plus une confiance illimitée dans les accumulateurs à dépôt naturel, la formation de ces accumulateurs n'est jamais complète; *elle est toujours à recommencer* et ce n'est qu'en employant les précautions *qu'on peut seulement prendre dans les laboratoires* qu'on parvient à obtenir des appareils dont la puissance d'emmagasinement peut atteindre la capacité des accumulateurs à dépôt artificiel.

Il ne faut pas se méprendre sur ce que je viens de dire. Je tiens à affirmer que tous les appareils, genre Planté, peuvent avoir, à poids égal, la même capacité d'emmagasinement que les appareils à dépôt artificiel; mais pour réaliser ce desideratum, il faut prendre des précautions excessivement minutieuses pour la formation qui, de plus, nécessitera une durée que je ne considère pas comme industrielle.

Dans les accumulateurs à dépôt artificiel, nous avons vu que la formation est beaucoup abrégée; mais la durée de l'électrode positive est trop réduite. Quel est le motif de cette faible durée de l'électrode positive? A mon avis, ce défaut provient de ce que les réactions chimiques se

produisent, non pas uniquement à travers la couche de matière active, mais encore à la surface du support, et que ce support sur une certaine épaisseur se transforme lui-même en matière active affectant un état différent du dépôt artificiel transformé. Celui-ci ne se trouve plus en contact direct avec un bon conducteur de l'électricité, puisqu'il en est séparé par le peroxyde brun à texture cristalline passé à l'état de sulfate de plomb, qui est un mauvais conducteur électrique.

De plus, il y a lieu de remarquer que le métal en passant à l'état de peroxyde gonfle et augmente de volume; il chasse donc devant lui le dépôt artificiel qui s'écaille et diminue encore son adhérence avec le support.

Le remède à apporter, selon moi, à cette importante question consiste à réaliser un système empêchant le support de travailler. En cimentant au moyen de certaines substances particulières le minium contre la plaque, on peut déjà constater que le défaut signalé est considérablement diminué.

Les considérations suivantes vont ensuite nous guider dans la construction des électrodes.

Les recherches faites sur les piles primaires au peroxyde de plomb et au peroxyde de manganèse, ont fait admettre par les électriciens que la résistance intérieure d'un élément diminue quand la partie formant le support conducteur est rigoureusement entourée de peroxyde de plomb ou de peroxyde de manganèse, plutôt que de liquide.

On a reconnu ensuite que la conductibilité d'une semblable électrode augmente avec le tassement des matières actives, c'est-à-dire avec la continuité de la matière solide et la diminution dans cette électrode des espaces vides remplis par le liquide.

En partant de ces principes, Leclanché a été amené à augmenter le tassement jusqu'à sa limite en comprimant le mélange : il a ainsi réalisé un des éléments les plus remarquables qui aient été inventés jusqu'aujourd'hui pour les piles primaires. Il suffit de considérer les chiffres relatifs à la résistance et à la force motrice des éléments Leclanché non agglomérés et à plaques agglomérées, pour se rendre compte de l'importance de ces principes.

Ces considérations ont échappé jusqu'ici aux inventeurs des accumulateurs, ces inventeurs s'appliquant, par un principe inverse, à augmenter le degré de porosité de leurs électrodes, c'est-à-dire à augmenter les espaces vides dont nous avons parlé ci-dessus.

L'accumulateur n'étant qu'une pile particulière, je me suis demandé si les principes qui avaient guidé Leclanché dans la construction de ses éléments primaires, n'étaient pas applicables ici. Après avoir reconnu qu'ils s'appliquaient dans le cas présent, voici comment j'ai constitué mes électrodes :

Une certaine quantité de résine, ou d'un autre agglutinant, portée à sa température de fusion, cimente, sous la pression énorme de 300 atmosphères environ, un mélange de peroxyde de plomb

obtenu par voie électro-chimique et de limaille de plomb, ou de morceaux de plomb affectant la forme de lames, fils, rubans, etc. Ces derniers éléments ont surtout pour objet de donner une bonne répartition du courant dans l'intérieur de l'électrode.

Il est clair qu'en effectuant à la main la pression de notre mélange, on ne peut obtenir qu'une pression de quelques kilos par centimètre carré, et il est aisé de comprendre que, dans ces conditions, la cohésion et l'adhérence ne peuvent qu'être imparfaites.

Au contraire, par mon aggloméré que j'obtiens sous la pression de 300 atmosphères, je soude en quelque sorte les particules de peroxyde actif à une matière conductrice, la limaille de plomb, et je réduis au minimum les dimensions des espaces vides dans ces électrodes.

La résine qui entre dans ce mélange forme déjà un véritable agglutinant, une sorte de cimentage entre les particules de peroxyde à un grand état de division et les éléments métalliques contre lesquels le peroxyde est tassé.

Comme je l'ai dit plus haut, il y a une certaine limite à l'épaisseur de la matière active ; c'est pourquoi je proportionne celle-ci à la surface totale des parties conductrices.

Quant au peroxyde brun obtenu par voie électrochimique, il a l'avantage de posséder son volume maximum ; je n'aurai donc pas à craindre un gonflement qui aurait pour résultat de disloquer la plaque.

Dans les premiers essais que j'avais tentés dans cette voie, en 1882, je m'étais servi de charbon purifié comme élément conducteur. J'ai toujours trouvé que les effets obtenus avec le charbon étaient absolument détestables. La force électro-motrice était faible, de même que la capacité d'emmagasinement. J'attribuais ce fait à la résistance de l'élément conducteur, le charbon; ce qui me confirma dans cette manière de voir, c'est que, en remplaçant le charbon par de la limaille de plomb qui formait un véritable enchevêtrement et en introduisant simplement dans le mélange un fil de plomb de trois millimètres pour réaliser le pôle, j'obtins immédiatement des effets surprenants. J'ai procédé ensuite à un grand nombre d'expériences dans lesquelles les deux électrodes étaient deux plaques agglomérées qui plongeaient dans un bain acidulé sulfurique; dans d'autres expériences, une seule électrode était formée par un aggloméré et l'autre par une plaque en cuivre, ou en zinc, ou en charbon, le bain étant alors constitué par une dissolution de sulfate de cuivre ou de sulfate de zinc. Dans tous ces cas, les agglomérés se sont parfaitement comportés et les résultats que j'ai obtenus m'ont engagé à en faire construire industriellement.

Dans les accumulateurs à dépôt naturel de matière active, il y a lieu de remarquer que l'électrode positive se *forme* plus rapidement que l'électrode négative. C'est même le motif pour lequel on donne souvent à l'électrode positive une surface double de celle de l'électrode négative. Tenant compte de cette considération,

j'ai combiné des accumulateurs dont l'électrode positive était constituée par une de mes anciennes plaques à fils parallèles et l'électrode négative était une plaque agglomérée. La formation de ce système d'accumulateurs se fait sans retournement et me donne de bons résultats. Ces appareils auront certainement une très grande durée, mais la formation exige plus de temps que les éléments à deux électrodes agglomérés.

Comme nous le verrons en étudiant les applications des accumulateurs électriques, il y aura lieu, dans certains cas, d'employer des accumulateurs à base de plomb, et, dans d'autres cas, des appareils à dissolution saline. C'est le degré de polarisation que pourra produire chaque application qui devra dicter le choix.

Dans la deuxième partie de cet ouvrage : *Étude sur l'emploi et le mérite des accumulateurs électriques,* nous aurons très souvent l'occasion de revenir sur nos éléments à plaques agglomérées.

§ 12.

ACCUMULATEURS DIVERS.

Depuis qu'on a reconnu que les accumulateurs pouvaient jouer un rôle important dans l'industrie, on a vu surgir une infinité de brevets pour ce genre d'appareils. Nous allons donner, d'une façon très succincte, d'après le *Recueil spécial des brevets belges*, la description des accumulateurs qui nous ont paru les plus intéressants.

ACCUMULATEURS A DÉPOT NATUREL DE MATIÈRE ACTIVE.

MM. Fitz-Gérald, Crompton, Biggs et Beaumont (brevet du 30 juin 1882), revendiquent comme leur invention :

« 1° La méthode servant à donner à une électrode de pile secondaire une structure poreuse offrant une grande surface, en éliminant par dissolution, par une action chimique ou par la chaleur, un élément d'abord intimement mélangé avec l'élément qui reste, ou la matière qui forme résidu dans l'électrode.

« 2° La préparation d'électrodes poreuses, pour piles secondaires, basée sur l'élimination, par électrolyse, du sodium, du zinc, du cadmium, du fer, de l'antimoine, du cuivre ou de l'argent, de mélanges ou alliages formés d'un ou de plusieurs de ces métaux et de plomb. »

Le double but recherché par ces Messieurs était donc

de donner une structure poreuse et de réaliser en même temps une grande surface. Leur procédé est sans doute ingénieux; mais nous n'en sommes pas partisans pour le motif indiqué plus haut et qui est relatif à l'augmentation de la porosité des électrodes.

M. Édison (brevet du 15 décembre 1882) revendique comme son invention :

« 1° Une électrode pour piles secondaires formée en partie ou entièrement de plomb métallique arborescent et homogène dans toute sa masse.

« 2° Une électrode pour piles secondaires, formée de plomb métalliques filamenteux, avec des parties massives homogènes. »

Nous n'aurions pas cité ce brevet qui n'est certainement pas digne d'un homme de la valeur d'Édison, si certains journaux n'avaient pas relaté, au commencement de 1883, un entretien qu'un rédacteur du *New-York, Sunday Hérald* avait eu avec Édison au sujet des accumulateurs électriques. Les accumulateurs, au dire d'Édison, ne valent rien, ce sont (traduction des *Annales de l'Électricité*) des attrape-nigauds dont les faiseurs se servent pour ramasser l'argent des dupes.

Dans son numéro du 28 février 1883, le journal *les Annales de l'Électricité* relevait, comme elle le méritait, cette appréciation exprimée avec tant d'élégance et de courtoisie; dans son numéro du 15 mai suivant, ce journal terminait un article par ces mots :

« Nous nous bornerons à faire remarquer que l'entrevue

dans laquelle M. Édison pourfendait les accumulateurs a eu lieu en janvier dernier, que son brevet français porte la date du 17 novembre 1882, et nous ne nous expliquons pas le revirement qui s'est opéré dans l'opinion de M. Édison, *à moins de supposer un insuccès*. On pouvait s'attendre à une invention transcendante, tandis que l'accumulateur Édison, d'après la description que nous citons, rentre tout simplement dans la pile Planté. Nous croyons qu'il n'est pas même sérieusement brevetable. »

C'est absolument notre opinion, et en supposant même que cet appareil soit brevetable, il doit être beaucoup moins bon que la pile primitive de Planté. Il est incontestable que les parties arborescentes et filamenteuses doivent *se détacher* de la partie massive avec une très grande facilité sous les actions de la charge et de la décharge. L'adhérence doit être beaucoup plus convenable dans l'appareil Planté.

M. St Georges Lane Fox (brevet du 31 janvier 1883) revendique comme caractères distinctifs de son invention :

« La construction des plaques des batteries secondaires de Planté en un certain nombre de lames ou feuilles de plomb, séparées par du sable ou matière poreuse et pressées ensemble, et la disposition des plaques épaisses ainsi obtenues dans un récipient contenant de l'acide sulfurique dilué, de telle manière que les bords des lames d'une plaque soient opposés, sans les toucher, aux bords des lames de l'autre plaque. »

C'est le système de Meritens amélioré, en ce sens que tout contact entre les lamelles est rendu impossible.

Nous croyons cependant que la matière poreuse introduite doit augmenter la résistance intérieure de l'élément.

ACCUMULATEURS A DÉPOT ARTIFICIEL.

M. Pfeifer (30 juin 1883) s'exprime comme suit :

« Le perfectionnement que j'apporte au couple secondaire, inventé par M. Planté, consiste dans l'application sur les lames de plomb constituant le couple, d'une couche de plomb spongieux obtenu par la décomposition d'un sel de plomb, au moyen d'un courant électrique. Le sel que je choisis dans ce but est l'acétate de plomb. »

Dans un brevet de perfectionnement, pris le 28 février 1883, M. Pfeifer réclamait :

« 1° L'application de ce plomb spongieux sous forme de tartines sur les lames de plomb, et 2° la disposition en parallélipipèdes de ce plomb spongieux au moyen de cadres et l'emploi de fils ou lamelles de plomb à l'intérieur de la masse active, pour servir d'électrodes. »

Il semble résulter des expériences qui ont été faites dans cette voie que le plomb est un métal difficile à déposer. On ne parvient pas à le fixer en couche uniforme ; par un dépôt galvanique il se forme de minces filaments qui se détachent trop facilement.

Ce procédé a déjà été expérimenté par M. Planté, il y a plus de quinze ans ; mais il n'a jamais donné un résultat satisfaisant.

L'invention de M. Aron (30 juin 1882) a pour objet :

« 1° La préparation de deux nouvelles substances, métallodium et métallodion, au moyen de métaux et de cellulose, ou de dérivés chimiques des deux.

« 2° La préparation de plaques polaires au moyen de métallodion ou de métallodium et d'un élément conducteur tel que métal ou charbon, avec et sans emploi d'un moyen d'attache tel que cellulose, laine, soie, feutre, etc.

« 3° La préparation de plaques polaires au moyen d'un métal finement divisé et de cellulose en dissolution. »

Les expériences qui ont été faites sur ces accumulateurs ont montré que l'attache de la matière active avec le support était beaucoup plus parfaite que dans l'accumulateur Faure.

M. Tribe (28 février 1883) a imaginé le système suivant :

« Mon invention est relative à des perfectionnements dans la construction des piles secondaires, et consiste dans l'emploi d'une ou de plusieurs plaques négatives composées de peroxyde de plomb, celui-ci étant à l'état comprimé, ou dans une autre condition convenable et de même en une plaque positive.

« En mettant mon invention à exécution, j'emploie ou bien une plaque négative consistant en peroxyde de plomb à l'état solidifié ou à l'état comprimé, ou bien j'emploie le peroxyde de plomb à l'état non solidifié ou non comprimé, ou dans quelque autre forme ou condition propre ou convenable, celui-ci étant contenu dans un vase ou réceptacle perforé ou poreux, non conducteur, qui n'est pas influencé électriquement, ou bien le peroxyde de plomb peut être employé directement à l'état mentionné ci-dessus, ou bien du peroxyde de plomb pré-

cipité peut être déposé sur la ou les surfaces de peroxyde de plomb, au moyen d'une action électro-chimique bien connue, ou bien par des moyens chimiques. »

Comme nous l'avons vu dans la description de notre accumulateur à plaques agglomérées, il est très avantageux de réduire la porosité de la matière active en la comprimant. L'avantage du peroxyde de plomb comprimé de M. Tribe est donc réel ; mais comment fait-il pour l'appliquer sur un support conducteur ? A-t-il un moyen spécial pour réaliser un bon contact électrique entre ce support et la matière active ? C'est ce qui eut dû être spécifié.

M. Frankland (15 mars 1883) revendique :

« 1° La formation d'une enveloppe ou couverte dure en émail sur la surface des plaques en plomb ou autres, ou dans les trous, ondulations, etc. de ces plaques ou toiles métalliques, pour servir dans des accumulateurs, le dit émail étant ensuite rendu actif par le courant d'une machine dynamo-électrique ou autre source d'électricité.

« 2° Pour les plaques destinées aux accumulateurs d'électricité, l'emploi d'un mélange durcissant, composé d'un oxyde de plomb quelconque, sauf le peroxyde, et d'acide sulfurique plus ou moins dilué, ou d'une solution d'acide phosphorique, ou d'acide chlorhydrique, ou d'acide oxalique, ou de tout autre acide ou solution d'acide, donnant lieu à des sels de plomb insolubles ou à peu près, le dit mélange faisant prise en durcissant rapidement et étant appliqué comme une garniture, couverte ou enveloppe, sur les plaques métalliques ou autres, destinées à la construction des accumulateurs. »

Il y a lieu de faire la même observation que celle que nous avons mentionnée à l'accumulateur précédent. Le contact électrique entre le support et la matière active est-il suffisamment assuré ?

L'invention de M. Sellon (15 mars 1883) a pour objet :

« La formation de plaques pour piles secondaires avec des interstices, ou perforations, ou espaces, qui renferment ou retiennent solidement en position la matière qui entoure ou couvre les plaques. »

Ce brevet a beaucoup d'analogie avec celui de M. Volckmar que nous avons donné ci-dessus.

L'accumulateur le plus répandu pendant l'année 1883 portait le nom d'*accumulateur Faure-Sellon-Volckmar;* il ne devrait, à notre avis, porter qu'un nom, celui de M. Volckmar. C'est évidemment le système qui a été breveté, en premier lieu, par M. Volckmar, et dont nous avons donné la description antérieurement.

M. Somzée (31 mai 1883) revendique comme sa propriété :

« Le mode de fabrication et l'emploi de plaques cellulaires en forme de gaufre simple ou double, qui, par leur réunion par deux ou trois ou un plus grand nombre de pièces, forment l'alvéole complète, recevant, retenant et englobant l'oxyde dans des surfaces de contact très développées, avec un poids relativement restreint de métal. »

Ce brevet n'a eu que le grand tort de venir après

celui de M. Volckmar. Je dois dire cependant que M. Somzée a parfaitement spécifié l'avantage des surfaces de contact très développées, tandis que M. Volckmar avait simplement voulu réaliser un appareil permettant de retenir solidement la matière active.

Malgré cette observation, les deux appareils sont absolument identiques.

ACCUMULATEURS A LIQUIDE AUTRE QUE L'EAU ACIDULÉE SULFURIQUE.

L'invention de M. Bœttcher (15 janvier 1883) a pour objet :

« La construction de batteries électriques secondaires caractérisées par la préparation d'un élément secondaire au moyen d'une solution de zinc sulfurique pur, et par l'application du courant d'une machine dynamo-électrique pour produire électrolytiquement la plaque inductrice positive, en immergeant des lames minces en zinc ou en plomb, dans la solution susdite et la plaque négative, en immergeant de la même manière des lames minces en plomb, couvertes d'un revêtement en plomb poreux, produit par la réduction du protoxyde de plomb avec l'emploi simultané d'acide acétique libre, contribuant à la formation et à l'augmentation du peroxyde de plomb. »

Comme on le voit c'est la combinaison d'une électrode à dépôt naturel de matière active avec le système à dissolution saline. Il y a quelque chose à faire dans cette voie ; mais nous avons expliqué les inconvénients du zinc dans une dissolution acidulée sulfurique. Les avantages seraient plus grands avec le charbon.

M. Nolf (19 janvier 1883) a caractérisé son invention par :

« L'usage d'une dissolution alcaline qui se décompose et se recompose continuellement, sans jamais être ni appauvrie, ni inutilisée. »

Nous ne connaissons pas d'expérience qui ait été faite sur les accumulateurs à dissolution alcaline. De même qu'il existe des piles primaires à liquide alcalin, nous croyons bien qu'il existera également, un jour, des accumulateurs à liquide alcalin.

DEUXIÈME PARTIE.

ÉTUDE SUR L'EMPLOI & LE MÉRITE

DES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

§ 1.

LOI DE DÉCOMPOSITION ÉLECTRO-CHIMIQUE.

La théorie électro-chimique des accumulateurs repose sur les lois de Faraday relatives à la décomposition des électrolytes.

D'après Faraday, la quantité d'actions chimiques, c'est-à-dire la quantité, en poids, des éléments séparés dans un électrolyte, est proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe dans le courant; en outre, les poids des éléments séparés sont dans le même rapport que leurs équivalents chimiques.

L'expérience prouve qu'un coulomb d'électricité, en traversant un électrolyte, met en liberté

0,000010521 grammes d'hydrogène.

Un gramme d'hydrogène exige donc, pour être libéré, un nombre de coulombs égal à

$$\frac{1}{0,000010521} = 95\,048.$$

Comme un ampère-heure vaut 3 600 coulombs, le nombre de 95 048 coulombs équivaudra à

$$\frac{95\,048}{3\,600} = 26{,}402 \text{ ampères-heure.}$$

La charge électrique d'un gramme libre d'hydrogène est ainsi de $26^{\text{a.-h.}},402$.

L'unité de poids dont on fait généralement usage dans les applications industrielles étant le kilogramme, nous dirons que la charge électrique d'un kilogramme libre d'hydrogène est de

$$26^{\text{a.-h.}},402 \times 1\,000^{\text{gr.}},26\,402 \text{ ampères-heure.}$$

Passons maintenant de l'hydrogène à un autre corps.

Désignons par m l'équivalent chimique de ce corps par rapport à l'hydrogène. Le courant de $26^{\text{a.-h.}},402$ capable de dégager un gramme d'hydrogène, par seconde, libérera m grammes du corps en question pendant le même temps; ce qu'on peut exprimer en disant qu'un gramme de ce corps, rendu libre, par seconde, exige un courant égal à celui qui est capable de dégager un gramme d'hydrogène divisé par m, soit $\frac{26^{\text{a.-h.}},402}{m}$.

Bien que le poids absolu d'un atome quelconque d'un corps nous soit inconnu, la chimie nous fait connaître le poids d'un atome de ce corps rapporté à celui de l'hydrogène; c'est ce que l'on appelle le *poids atomique;* la chimie nous donne le poids atomique d'un grand nombre de substances.

De plus, la doctrine de l'atomicité attribue aux atomes des différents corps une certaine puissance d'*affinité élective,* et chaque atome possède une aptitude

particulière à se combiner avec 1, 2, 3, etc., c'est-à-dire avec *un nombre déterminé d'autres atomes.*

Nous avons remarqué que, pour la plupart des corps qui entrent dans la composition des accumulateurs, en divisant le poids atomique par le nombre d'unités d'affinité intéressées, on avait l'*équivalent chimique.*

Si donc, au lieu de l'hydrogène, l'on a un corps d'un poids atomique e avec une puissance d'affinité égale à u (le rapport $\frac{e}{u} = m$ étant l'équivalent chimique), la charge électrique d'un kilogramme de ce corps sera de $\frac{26\,402 \times u}{e}$, ce nombre étant exprimé en ampères-heure.

Supposons qu'au bout d'un temps T, sous l'influence du passage du courant, il y ait un poids P du corps en question libéré ou mis en action ; P contiendra un nombre N de kilogrammes.

Comme la charge électrique d'un kilogramme a été trouvée égale à $\frac{26\,402 \times u}{e}$, il s'ensuit que la quantité d'électricité Q qui aura traversé les N kilogrammes pendant le même temps T sera :

$$Q = \frac{N \times 26\,402 \times u}{e} \text{ ampères-heure ;}$$

ou bien : $$Q = N \times 26\,402 \times \frac{1}{m}.$$

La loi de Faraday nous autorise à poser :

$$\frac{P}{Q} = \frac{N}{N \times \frac{26402 \times u}{e}} = \frac{e}{26\,402 \times u} = \frac{m}{26\,402}, \quad (1)$$

formule que nous traduirons de la manière suivante :

Dans un accumulateur d'électricité, le poids, en kilogrammes, des éléments mis en action est à la

quantité d'électricité qui passe dans le courant, exprimée en ampères-heure, comme le poids atomique des éléments est à 26 402 fois le nombre d'unités d'affinité intéressées, ou bien comme l'équivalent chimique de ces éléments est à 26 402.

Il y a lieu de remarquer que cet énoncé est parfaitement général. Comme le constate très bien le professeur Olivier Lodge : « Que ce soit la substance ou la partie constitutive qui est mise en liberté au pôle positif ou au pôle négatif, ou bien le composé originaire qui n'est pas séparé mais bien décomposé, cela n'a pas d'importance. »

La formule (1) permettra de calculer la quantité de substances entrées en combinaison ou décomposées par un courant donné, ou, inversement, elle fournira le moyen de déterminer la quantité d'électricité nécessaire pour mettre en action un poids donné dans un temps voulu.

Comme on le verra ultérieurement, nous déduirons de cette formule des conséquences extrêmement intéressantes concernant la formation des accumulateurs électriques.

Le tableau ci-après donne les équivalents chimiques et les poids atomiques des corps dont on se sert généralement en pratique.

NOMS DES CORPS.	ÉQUIVALENTS CHIMIQUES.	POIDS ATOMIQUES.	NOMS DES CORPS.	ÉQUIVALENTS CHIMIQUES.	POIDS ATOMIQUES.
Hydrogène. . . .	1	1	Potassium	39,1	39,1
Azote	4,3	14	Acide sulfurique. .	49	»
Carbone	6	12	Chlorydrate d'ammoniaque. . . .	53,5	»
Oxygène.	8	16	Or	65,5	196,6
Soufre.	16	32	Platine.	99,5	198
Sodium	23	23	Mercure	100	200
Chrome	26	52	Plomb	103,5	207
Manganèse. . . .	27,6	55	Litharge, PbO. . .	111,5	223
Fer	28	56	Argent.	108	108
Cuivre.	31,5	63	Sulfate de cuivre .	124,7	»
Zinc.	32,6	65	Bichrom. de potasse.	148,5	»
Chlore.	35,5	35,5			

Appliquons la formule (1) aux deux problèmes suivants :

PROBLÈME I. — *On veut décomposer une solution de sulfate de cuivre et déposer sur l'électrode négative un poids de 500 grammes de cuivre. Quelle sera la quantité d'électricité nécessaire pour obtenir ce dépôt ?*

Le poids atomique e du cuivre est 63, et son atomicité est égale à 2, c'est-à-dire qu'il y a deux unités d'affinité intéressées; en d'autres termes, l'équivalent chimique du cuivre est $\frac{63}{2} = 31,5$.

Nous ferons dans la formule $P = 0^{k.},500$; Q étant l'inconnue, la formule (1) devient :

$$\frac{0^{k.},500}{Q} = \frac{63}{26\,402 \times 2};$$

d'où : $Q = \frac{0,500 \times 26\,402 \times 2}{63} = 419$ ampères-heure.

PROBLÈME II. — *On veut réduire, à l'état de plomb, de la litharge* PbO. *Combien de kilogrammes pourra-t-on réduire au moyen de 1 000 ampères-heure?*

L'inconnue est P. Le poids atomique $e = 223$ et il y a 2 unités d'affinité séparées; nous aurons donc :

$$\frac{P}{1\,000} = \frac{223}{26\,402 \times 2} = \frac{223\,000}{52\,804} = 4^{k.},223^{gr.}.$$

§ 2.

ACTIONS CHIMIQUES PRODUITES DANS LES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

ACCUMULATEURS A BASE DE PLOMB.

Lorsque nous avons décrit l'accumulateur Planté, nous avons donné une explication très sommaire des réactions chimiques qui se produisent dans le couple sous l'action du courant primaire et pendant la décharge. Cette explication a besoin d'être complétée.

Il paraîtrait que le mécanisme de ces réactions est excessivement complexe. Les principales hypothèses qui ont été émises sur la chimie des piles secondaires, genre Planté, peuvent se résumer, d'après M. Reynier, dans les formules ci-dessous; le premier membre de chaque équation indiquant l'état chimique des électrodes après la charge, et le second membre leur état chimique après la décharge :

$$Pb + PbO^2 = PbO + PbO. \quad (1)$$

$$2Pb + PbO^2 = Pb^2O + PbO. \quad (2)$$

$$2Pb + 2PbO^2 = Pb^2O + Pb^2O^3. \quad (3)$$

$$PbH + PbO^2 = Pb + HO + PbO. \quad (4)$$

$$Pb + SO^4H + PbO^2 = PbO + HO + SO^4Pb. \quad (5)$$

$$Pb + SO^4H + PbO^2 = SO^4Pb + HO + PbO. \quad (6)$$

$$Pb + 2SO^3 + Aq + PbO^2 = SO^4Pb + Aq + SO^4Pb. \quad (7)$$

Nous allons rapporter l'opinion des principaux physiciens qui ont étudié cette question.

D'après Planté, sous l'action de la charge et de la décharge, les réactions chimiques se passent purement et simplement de la manière que nous avons indiquée, d'une part, dans l'étude du voltamètre au plomb, et, d'autre part, dans la description de l'accumulateur de ce savant physicien.

Sous l'action du courant primaire, l'eau se décompose en ses deux éléments constitutifs; l'oxygène peroxyde l'électrode positive et l'hydrogène se porte sur l'électrode négative qui est toujours plus ou moins oxydée par son exposition à l'air.

« Lorsqu'on ferme le circuit secondaire, dit Planté, l'eau étant décomposée à l'intérieur du couple, en même temps que l'hydrogène se porte sur la lame peroxydée, l'oxygène se porte sur la lame maintenue précédemment métallique par le courant primaire et l'oxyde légèrement. Cette oxydation est même visible; car la lame de plomb négative se ternit immédiatement, dès qu'on ferme le circuit secondaire. »

M. Faure, qui s'est beaucoup occupé de la théorie chimique de sa pile, « a cru pouvoir établir que l'effet immédiatement observable était le transport d'une certaine quantité d'oxygène d'une électrode à l'autre, et vice-versa, suivant la proportion établie en électrochimie, et que pendant la décharge, par exemple, le plomb réduit devenait Pb^2O, tandis que le plomb peroxydé Pb^2O^4 devenait Pb^2O^3. »

Ce serait donc à la formule (3) que se rallierait M. Faure.

MM. Gladstone et Tribe, ainsi que M. Reynier, admettent que la décharge s'effectue selon la formule (7) :

$$Pb + 2SO^3 + Aq + PbO^2 = SO^4Pb + Aq + SO^4Pb,$$

c'est-à-dire qu'il y aurait une production de sulfate de plomb sur les deux électrodes.

Pendant la charge, les phénomènes se passeraient comme suit : d'un côté,

$$(\text{électrode} +)\ SO^4Pb + O = PbO^2 + SO^3;$$

et de l'autre,

$$(\text{électrode} -)\ SO^4Pb + H = Pb + SO^3 + HO.$$

M. Reynier nous dit que la première de ces deux réactions a été généralement admise, et que la seconde a été contestée par le professeur Olivier Lodge et sir William Thomson qui n'ont pu obtenir nettement la réduction électrolytique du sulfate de plomb. MM. Gladstone et Tribe ont ultérieurement réussi à l'obtenir.

Indépendamment de ces actions principales, il se forme, d'après les trois physiciens dont nous rapportons l'opinion, du sulfate de plomb, par l'action d'un couple local constitué par le peroxyde et le plomb métallique de l'électrode positive.

Les conclusions auxquelles est arrivé M. Frankland sont formulées de cette manière :

« Il me semble que pendant la décharge d'un accumulateur, les effets chimiques sont les suivants :

« 1° L'électrolysation de l'acide sulfurique hexabasique comme pendant la charge;

« 2° La transformation de l'anhydride sulfurique en acide sulfurique hexabasique ;

« 3° L'action chimique sur le dépôt de la lame, qui, primitivement positive, est devenue négative, c'est-à-dire celle d'où s'échappe le courant positif par le circuit extérieur,

« $Pb O^2 + H^2 = Pb O + H^2 O$.

« L'oxyde de plomb ainsi formé est immédiatement converti en sulfate de plomb :

« $Pb O + SO^6 H^6 = SO^4 Pb + 3 OH^2$;

« 4° L'action chimique sur le dépôt de la lame négative devenue actuellement positive :

« $Pb + O + SO^6 H^6 = SO^4 Pb + 3 OH^2$.

« Ainsi, pendant la décharge d'un accumulateur, comme pendant la charge, l'action initiale est due à l'électrolysation de l'acide sulfurique *hexabasique*. L'oxygène éliminé sur la lame positive convertit le métal réduit de cette lame en oxyde de plomb, tandis que l'hydrogène transforme dans le même oxyde le peroxyde de plomb de l'autre lame. Dans les deux cas, cet oxyde de plomb est de suite converti en sulfate de plomb par l'acide sulfurique ambiant, remettant ainsi les deux lames dans les conditions où elles se trouvaient avant le commencement de la charge. »

M. Frankland admet ainsi l'électrolyse d'un acide sulfurique hexabasique.

Telles sont, résumées très brièvement, les opinions principales émises sur la théorie chimique des piles secondaires à base de plomb et rapportées plus longuement par M. Reynier dans son *Essai sur la théorie chimique des accumulateurs*.

Comme on le voit, cette question est loin d'être aussi simple qu'on le croit généralement.

Nous allons donner notre opinion personnelle, en nous appuyant autant sur des observations d'ordre physique que sur l'analyse chimique qui, dans le cas présent, donne, il faut bien le reconnaître, des résultats souvent contradictoires.

Pendant la charge d'un accumulateur à lames de plomb, la surface de l'électrode positive prend la couleur brune, tandis que l'électrode négative gagne la couleur gris-blanc qui, pendant la décharge, devient plus foncée ; l'électrode semble alors se recouvrir d'un voile sombre. Si on laisse reposer l'appareil pendant quelques semaines, on constate que les électrodes se recouvrent d'un dépôt blanchâtre.

A mon avis, pendant la charge, le courant primaire *a uniquement pour résultat* de décomposer l'eau, H^2O, en produisant sur l'électrode positive une couche de peroxyde de plomb, PbO^2, et de réduire à l'état de Pb sur l'électrode négative, la couche d'oxyde qui s'y était formée pendant la décharge précédente.

Lorsqu'on fait passer un courant primaire à travers un voltamètre à électrode de platine et à eau acidulée sulfurique, n'est-il pas vrai que l'acide sulfurique fait uniquement partie du bain, parce qu'il est bon conducteur de l'électricité? Dans ce voltamètre, c'est également l'eau qui est décomposée en ses deux éléments constitutifs, en gaz oxygène et en gaz hydrogène ; l'acide sulfurique n'y intervient que pour faciliter la décomposition de l'eau, grâce à sa bonne conductibilité électrique.

Pendant la décharge d'un accumulateur à base de plomb, il se passe, selon moi, un phénomène absolument identique. Le peroxyde de plomb, par suite de sa grande affinité pour l'hydrogène, décompose *uniquement* l'eau et est ramené à un état d'oxydation moindre, PbO, tandis que l'électrode négative se recouvre à son tour d'une couche d'oxyde plombique, PbO.

L'acide sulfurique intervient surtout pour la conductibilité du liquide.

Voilà, à mon avis, *les actions principales* qui se produisent dans un accumulateur à base de plomb, pendant la charge et pendant la décharge du couple. Mais indépendamment de ces actions principales, j'admets qu'il existe *des actions secondaires* dont le degré de puissance dépend de la formation de l'élément, de la rapidité plus ou moins grande de la charge et de la décharge, et de la résistance du circuit extérieur. Les actions secondaires résultent non pas de l'électrolyse engendrée par le passage du courant primaire, mais elles résultent d'une combinaison qui est *ultérieure* à celle engendrée par l'électrolyse : c'est la combinaison de l'oxyde du plomb qui s'est formé sur les deux électrodes avec l'acide sulfurique faisant partie du bain. Je dis que cette action est secondaire, car il n'est pas nécessaire que l'accumulateur fonctionne pour constater que les deux électrodes se recouvrent de sulfate de plomb.

Pour s'en convaincre, il suffit de laisser reposer pendant quelques semaines un accumulateur, genre Planté,

de préférence un accumulateur à dépôt artificiel de matière active. Lorsqu'après ce laps de temps, on veut charger l'accumulateur, on constate que le courant ne passe pas pendant les premiers moments de la charge; parfois il faut même un courant énergique de plusieurs heures pour vaincre la résistance qui s'oppose à la libre circulation du fluide électrique. La cause de cette résistance, c'est la production de la couche de sulfate de plomb *qui s'est formée pendant le repos*. Le sulfate est un très mauvais conducteur d'électricité et ce n'est que lorsqu'il est partiellement réduit que le courant peut circuler d'une façon normale.

Si on remonte aux actions principales dans le sens que nous avons indiqué, l'on observe que, pendant la décharge, les deux électrodes tendent à se recouvrir d'une couche d'oxyde plombique, PbO.

Mais cet oxyde, *en présence de l'acide sulfurique, a la faculté de se combiner avec celui-ci*, et c'est ainsi que, pendant la décharge, *une très faible partie* de sulfate de plomb se mélange avec le peroxyde sur la lame positive et avec le plomb et l'oxyde plombique sur la lame négative. Si on abandonne ensuite l'appareil pendant quelque temps, la combinaison de l'oxyde avec l'acide sulfurique gagne en surface et en épaisseur, et c'est ainsi qu'au bout de quelques mois, on trouve, par l'analyse, une si grande quantité de sulfate de plomb sur les deux électrodes.

Nous avons vu que MM. Gladstone et Tribe, après avoir expliqué l'action principale suivant la formule (7),

admettent qu'il se forme encore du sulfate de plomb, par l'action d'un couple local, constitué par le peroxyde et le plomb métallique de l'électrode positive :

$$PbO^2 + Pb + 2SO^3 = 2SO^4Pb.$$

Le sulfate serait ensuite réduit pendant la décharge, en fournissant du plomb spongieux.

Sans contester la production du sulfate résultant de l'action d'un couple local, je ferai cependant remarquer qu'il suffit de jeter, dans un bain d'eau acidulée sulfurique, un oxyde de plomb, pour constater qu'au bout d'un certain temps cet oxyde s'est transformé en sulfate de plomb. Il n'est donc pas nécessaire, pour obtenir cette transformation, que le peroxyde soit en contact avec le plomb, et partant qu'il y ait production d'un couple local.

En résumé, je partage l'avis émis par M. Planté, en admettant toutefois qu'une action secondaire *suit* l'action principale. C'est, en définitive, l'opinion de M. Frankland avec cette différence que je ne recours pas à l'existence d'un acide sulfurique hexabasique.

Je crois que l'action secondaire peut se formuler comme suit :

$$PbO + H^2SO^4 = SO^4Pb + H^2O.$$

D'après cette formule, pendant la décharge, alors que les deux électrodes tendent à affecter la forme PbO, on aura une décomposition de l'acide sulfurique qui devra diminuer de densité : c'est précisément ce que *l'expérience démontre.*

Pendant la charge, le sulfate de plomb se réduira en régénérant l'acide sulfurique qui augmentera de densité : c'est encore prouvé par l'expérience.

La décharge ayant ramené une grande partie des couches actives à l'état de PbO, il s'ensuit que, par le repos, la présence de l'acide sulfurique dans le bain aura pour effet de sulfater PbO.

ACCUMULATEURS A DISSOLUTION SALINE.

Dans les accumulateurs appartenant à cette catégorie, l'action du courant primaire a pour effet de décomposer la dissolution en ses éléments constitutifs.

Prenons l'accumulateur au cuivre. Nous savons qu'il est formé par une électrode en plomb et une électrode en cuivre ou en charbon, le bain étant une dissolution de sulfate de cuivre légèrement acidulée par l'acide sulfurique.

Pendant la charge, l'équation chimique peut, selon nous, se formuler comme suit :

$$Cu + CuSO^4 + H^2O + PbO = CuCu + SO^4H^2 + PbO^2.$$

Il s'ensuit donc que le métal de la dissolution se dépose sur l'électrode négative et que le plomb de l'électrode positive se peroxyde. Le sulfate de cuivre, en disparaissant, engendre en même temps de l'acide sulfurique.

La liqueur pâlit, en effet, au point de devenir absolument claire, lorsque tout le sulfate est décomposé.

Pendant la décharge, l'équation doit être inverse, ce qui a pour conséquence de régénérer le sulfate de cuivre de couleur bleue, et de réduire la densité de l'acide sulfurique.

J'estime, comme dans l'accumulateur précédent, que ce sont là les *actions principales*, et qu'une action secondaire se produit encore ici, cette dernière ayant pour effet de donner sur l'électrode positive du sulfate de plomb en faible quantité, mélangé au peroxyde de plomb.

L'action secondaire, surtout pendant le repos, a également pour effet de transformer le métal de l'électrode négative en sulfate de cuivre. Il se produit une véritable dissolution du métal par suite de l'acide qui entre dans le bain. C'est ainsi que nous avons constaté que, dans des accumulateurs à sulfate de cuivre que nous avions laissés reposer pendant quelques semaines, l'électrode négative, formée d'une plaque de métal, était trouée en un grand nombre d'endroits. Le cuivre se dissolvait donc dans le bain. C'est précisément pour éviter cette dissolution du cuivre dans le bain, que nous avons remplacé ultérieurement cette électrode-support par une plaque de charbon.

Les réactions chimiques sont alors absolument les mêmes que celles que nous avons mentionnées ci-dessus, car le charbon joue uniquement le rôle de support.

Dans les accumulateurs à sulfate de zinc ou à sulfate de fer, les réactions sont encore identiques; seulement

l'attaque du zinc ou du fer par l'acide sulfurique est très sensible; c'est pourquoi on remplacera avantageusement l'électrode négative de ces accumulateurs par une plaque de charbon.

Il est inutile d'introduire dans le liquide une proportion de 1/10 d'acide sulfurique, car plus ce dernier se trouve en grande quantité et plus est rapide la dissolution de l'électrode négative. Nous considérons que l'acide sulfurique ne doit avoir d'autre effet que d'augmenter la conductibilité du bain.

§ 3.

FORMATION.

1° ACCUMULATEURS A BASE DE PLOMB ET A DÉPOT NATUREL DE MATIÈRE ACTIVE.

La formation de ce genre d'accumulateurs a pour but de transformer une certaine épaisseur des électrodes en matière active, c'est-à-dire en peroxyde de plomb, d'une part, et en plomb réduit, d'autre part.

La formation est obtenue au moyen d'une suite de charges et de décharges successives effectuées avec changements de sens du courant primaire et intervalles de repos laissés entre ces changements.

Les lames positives se forment deux fois plus vite que les lames négatives; c'est pourquoi il est utile d'intervertir le sens du courant de charge.

Quant aux intervalles de repos, ils ont cette conséquence qu'ils donnent à la matière active une texture cristalline qui augmente son adhérence.

Nous donnons ci-dessous un tableau qui indique la durée et le sens des vingt premières charges.

On voit que la majoration du temps est chaque fois de un quart d'heure ; on suivra cette méthode jusqu'au moment où la durée de la charge sera de sept heures environ. A partir de cet instant, il n'y a plus lieu de changer le sens du courant; on doit admettre définitivement qu'une électrode donnera le pôle positif de

l'élément, et l'autre électrode le pôle négatif; ensuite, la charge devra toujours se faire dans le même sens.

NUMÉROS DES CHARGES.	DURÉE DES CHARGES EN SENS DIRECT.	DURÉE DES CHARGES EN SENS INVERSE.
1	1/4 d'heure.	»
2	»	1/4 d'heure.
3	1/2 heure.	»
4	»	1/2 heure.
5	3/4 d'heure.	»
6	»	3/4 d'heure.
7	1 heure.	»
8	»	1 heure.
9	1 heure 1/4.	»
10	»	1 heure 1/4.
11	1 heure 1/2.	»
12	»	1 heure 1/2.
13	1 heure 3/4.	»
14	»	1 heure 3/4.
15	2 heures.	»
16	»	2 heures.
17	2 heures 1/4.	»
18	»	2 heures 1/4.
19	2 heures 1/2.	»
20	»	2 heures 1/2.

Cette formation exigera 66 charges, dont 33 dans un sens et 33 dans l'autre sens; il faut compter que ces 66 charges auront réclamé environ 200 heures, et si l'on

y ajoute la durée des décharges, on arrivera à un laps de temps supérieur à deux mois pour cette formation.

En décrivant l'accumulateur Planté, nous avons dit que ce savant physicien recommandait dernièrement la manière d'obtenir une formation rapide au moyen du traitement des lames de plomb, avant l'action du courant primaire, par l'acide nitrique étendu de deux fois environ son volume d'eau.

Ce traitement a pour effet de dissoudre une partie des lames, mais le degré de pénétration des actions électrolytiques peut alors s'exercer plus profondément.

J'ai beaucoup essayé ce système que je ne considère pas comme industriel. L'opération du lavage des électrodes ainsi préparées est absolument désespérante, et l'on ne parvient jamais à obtenir une adhérence comparable à celle qui résulte de la transformation électrochimique du plomb qui n'a subi aucune préparation.

M. Planté reconnaît, d'ailleurs, que l'eau ordinaire qui devient laiteuse sous l'action de l'azotate de plomb, se trouble encore après avoir été plus de *cinquante fois* renouvelée, les lames de plomb n'abandonnant que très difficilement les dernières traces d'azotate restées emprisonnées dans les pores. Cependant il est essentiel, dit-il, de laver, d'une manière parfaite, les lames de plomb.

Il y a lieu de remarquer qu'au traitement par l'acide nitrique succède l'immersion des plaques dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique ; de là, précipitation du sulfate de plomb qui nécessite de *nouveaux lavages*

pour débarrasser les lames du sel qui peut recouvrir leur surface ou en obstruer les pores. Il n'y a pas lieu de laisser ce sel adhérer à la surface, car le sulfate de plomb ne fait pas corps avec le métal comme le peroxyde de plomb ; l'adhérence n'est donc qu'imparfaite. De plus, M. Planté ajoute que le sulfate de plomb ne se réduit ou ne se transforme en peroxyde sous une action électrolytique, même énergique, qu'avec une extrême lenteur, par suite de son insolubilité, de sa faible conductibilité et de l'imperfection du contact électrique avec les électrodes.

En résumé, les modifications moléculaires que le traitement par l'acide nitrique engendre, ont cette conséquence qu'une lame ainsi préparée peut être comparée à une électrode recouverte d'un dépôt artificiel de matière active. Le grand avantage de l'adhérence se réduit notablement, et l'on a, en outre, l'inconvénient de perdre une partie du métal par la dissolution dans l'acide nitrique.

Ce procédé peut être utile lorsqu'il s'agit d'expériences de laboratoire, mais nous regrettons de ne pouvoir nous y rallier, industriellement parlant, et plutôt que de recourir à cette formation que l'on pourrait, avec beaucoup de raison, appeler *la formation par lavage,* nous croyons qu'il est préférable d'adopter immédiatement la formation rapide au moyen d'un dépôt d'oxyde plombique.

2° ACCUMULATEURS A BASE DE PLOMB ET A DÉPOT ARTIFICIEL DE MATIÈRE ACTIVE.

Considérons notre système d'accumulateur à plaques agglomérées formées par un mélange de

5 parties de résine ou d'un autre agglutinant,
75 parties de métal conducteur,
et 20 parties d'un oxyde de plomb.

Supposons qu'on ne choisisse pas, pour ce dernier, le peroxyde de plomb lui-même obtenu par voie électrochimique, et demandons-nous si le minium doit être choisi à la litharge pour les deux électrodes.

Rappelons d'abord que, dans les accumulateurs à base de plomb, l'on doit arriver à obtenir, sur l'électrode positive, du peroxyde de plomb, PbO^2, et sur l'électrode négative, du plomb réduit, Pb.

1er CAS. *Emploi du minium comme oxyde entrant dans le mélange.* — Le minium a un poids atomique de 685, et sa constitution chimique paraît être Pb_3O_4.

Pour oxyder le minium Pb_3O_4 à l'état de PbO_2, la chimie indique qu'il y a 4 unités d'affinité intéressées. La loi que nous avons trouvée à l'article « *Décomposition électro-chimique produite dans les accumulateurs* », nous autorise à dire que la quantité d'électricité exprimée en ampères-heure, nécessaire pour peroxyder un kilogramme de minium, est égale à :

$$\frac{26\,402 \times 4}{685} = 154 \text{ ampères-heure.}$$

Pour la réduction du minium, il faut, d'après la

chimie, séparer 8 unités d'affinité; la réduction d'un kilogramme de minium à P*b* exige donc :

$$\frac{26\,402 \times 8}{685} = 308 \text{ ampères-heure.}$$

Il s'ensuit que si l'on choisissait du minium pour les deux électrodes, la quantité qui serait réduite dans un temps donné ne vaudrait que la moitié de celle qui serait peroxydée. Il y aurait ainsi lieu de proportionner convenablement les épaisseurs des électrodes, sinon il arriverait que le métal conducteur entrant dans l'électrode positive serait attaqué, ou plutôt se peroxyderait, alors que toute la quantité de minium à réduire sur l'autre électrode ne serait pas complètement transformée en P*b*.

2e CAS. *Emploi de la litharge.* — Sa constitution chimique est P*b*O et son poids atomique vaut 223.

La peroxydation, de même que la réduction de la litharge, sépare 2 unités d'affinité. Un kilogramme de litharge peroxydée ou réduite aura donc exigé :

$$\frac{26\,402 \times 2}{223} = 237 \text{ ampères-heure.}$$

En rapprochant ce chiffre de celui que nous avons trouvé pour le minium, on voit que le dispositif le plus rationnel consiste à employer le minium pour l'électrode positive et la litharge pour l'électrode négative.

En outre, si les poids des deux électrodes étaient les mêmes, comme il faut 237 ampères-heure pour réduire un kilogramme de litharge, alors que la peroxydation ne réclame que 154 ampères-heure, l'on s'exposerait à voir le métal conducteur de la plaque positive attaqué

comme ci-dessus, tandis que toute la litharge n'aurait pas été réduite.

Il en résulte que, si l'on veut que la formation se fasse, sur les deux électrodes, d'une façon absolument égale, le poids de la litharge devra être au poids du minium dans le rapport de $\frac{154}{237}$, soit 0,6 environ.

La théorie électro-chimique des accumulateurs a donc eu cette première conséquence, qu'elle nous a indiqué les oxydes de plomb qu'il y avait lieu de choisir pour obtenir la formation la plus rapide; elle nous a de plus montré que la disposition la plus rationnelle est de donner à la litharge un poids égal à 0,6 seulement du poids du minium.

Il existe encore une considération qu'il est utile de faire connaître.

Pendant le chargement des accumulateurs, on constate que des bulles de gaz, provenant de l'électrolyse, se dégagent à la surface du liquide. Quelle que faible que soit cette quantité, il faut en tenir compte.

En effet, les calculs ci-dessus ont été faits dans l'hypothèse où il n'y avait pas de perte d'électricité résultant soit du dégagement des gaz, soit des actions parasites, soit de la réduction spontanée du peroxyde au fur et à mesure qu'il se produit. Les molécules gazeuses qui se dégagent devraient exercer une action oxydante ou réductrice sur les électrodes; or, elles sont soustraites à cette action, puisqu'elles viennent crever à la surface du bain sous forme de bulles.

Si l'on se place dans de bonnes conditions de

chargement, cette perte d'électricité ne dépasse pas dix p. c. Il s'ensuit donc que le chiffre de 154 ampères-heure, trouvé plus haut, doit être majoré de dix p. c., soit de $15^{\text{amp.}},4$, ce qui fait un total de $170^{\text{a.-h.}}$ en chiffres ronds.

D'après le mélange que nous avons donné ci-dessus, l'on s'aperçoit que dans un kilogramme d'électrode, il y a environ un quart de kilogramme d'oxyde de plomb (peroxyde, minium ou litharge, etc.). Par conséquent, l'on peut dire que, lorsqu'on aura transformé un kilogramme d'oxyde plombique en matière active, on aura, par le fait même, formé 4 kilogrammes d'électrodes d'accumulateur.

Une application numérique fera saisir aisément tous les raisonnements qui précèdent.

Recherchons combien de temps il faudra pour former une tonne d'accumulateurs à plaques agglomérées, alors qu'on dispose d'une machine dynamo-électrique donnant 100 volts et 16 ampères.

Supposons que les accumulateurs dont il s'agit aient une force électro-motrice maxima de $2^{\text{v.}},36$, pendant la charge; la machine donnant 100 volts, on pourra grouper en tension $\frac{100}{2,36} = 42$ éléments.

Le poids de chaque élément sera de $\frac{1000^{\text{k.}}}{42} = 24$ k^{os}.

Pendant que 154 ampères-heure forment 4 k^{os} de plaques positives, il y a $0,6 \times 4^{\text{k.}} = 2^{\text{k.}},40$ de plaques négatives qui subissent la réduction, de sorte que 154 ampères-heure forment un total de $4 + 2,4 = 6^{\text{k.}},4$ d'électrodes d'accumulateur. Les éléments pesant 24 k^{os},

il faudra, pour leur formation, un nombre d'amp.-heure égal à $154 \times \frac{24}{6,4}$, soit 154×6 en chiffres ronds, c'est-à-dire 924 ampères-heure. La machine dynamo fournit un courant de 16 ampères ; le nombre d'heures nécessaire à la formation sera ainsi de $\frac{924}{16} = 58$. En majorant ce chiffre de 10 p. c., on obtient $58 + 5,8 = 63,8$, ou 7 jours en chiffres ronds, à raison de 9 heures de charge par jour.

Avant d'aborder les accumulateurs à dissolution saline, nous devons dire que certains inventeurs ont essayé de diminuer la durée de formation en faisant plonger des lames de plomb dans un liquide formé d'un sel de ce métal. Ce mode de formation est défectueux. Nous nous contenterons de rappeler que, déjà en 1872, M. Planté publiait dans le journal « *les Mondes* » un article concernant des essais effectués dans le but de produire le peroxyde de plomb sur les lames aux dépens du liquide.

« Avec des solutions acides, disait Planté, le plomb se dépose sur la lame négative, sous forme d'aiguilles cristallines qui établissent des contacts avec la lame positive ; et si l'on recourt à des solutions alcalines, le plomb se dépose sous une forme spongieuse qui augmente rapidement de volume et présente un inconvénient analogue au précédent. »

Les résultats d'expérience suivants permettent de se rendre compte de la différence qui existe entre la durée de la formation des accumulateurs à dépôt naturel et celle des couples à dépôt artificiel.

Une batterie d'accumulateurs toute neuve, appartenant à notre système d'éléments à plaques agglomérées, ayant été chargée par un courant moyen de un ampère par kilogramme, pendant *un seul jour*, (la charge avait duré environ 7 heures), éclaira, pendant toute la nuit qui suivit la charge, une lampe à incandescence de un ampère.

Nous ne sommes jamais parvenu à atteindre un tel résultat avec nos accumulateurs à fils parallèles avant *vingt jours de formation.*

La lampe avait été allumée à 7 h. du soir, et, lorsqu'on recommença la charge, le lendemain, à 8 h. du matin, l'intensité lumineuse n'avait pas diminué.

En tenant compte du poids des éléments, on trouvait par le calcul que la capacité de nos couples à plaques était, déjà après le premier jour de formation, *supérieure* à 3 600 coulombs par kilogramme d'électrode.

Là ne se borne pas seulement la différence des résultats.

Une batterie qui venait d'être directement fabriquée fut chargée pendant trois heures. Elle fut déchargée sur 3 lampes Swan de 24 volts; 12 éléments suffirent pour leur donner une forte intensité lumineuse, alors que 15 éléments à fils parallèles, ayant travaillé plus de 500 heures, étaient nécessaires pour obtenir la force électro-motrice capable de donner aux trois lampes la même intensité lumineuse.

Il y a lieu de remarquer que, dans ces deux batteries à plaques agglomérées, l'oxyde de plomb qui entrait

dans la composition des plaques était du minium et non du peroxyde de plomb, PbO^2.

Un élément à plaques agglomérées possède une force électro motrice de $2^{v.},15$, après *une heure* de formation, alors qu'après 1 000 heures de formation, la force électro-motrice des éléments à dépôt naturel n'est guère supérieure à $1^{v.},9$.

3° ACCUMULATEURS A DISSOLUTION SALINE.

1° Accumulateur au cuivre. Si l'on veut obtenir une formation rapide, il est clair que l'on adoptera le minium pour l'électrode positive. Quant à l'électrode négative, on prendra une plaque soit en cuivre, soit en charbon; le bain est, comme on sait, une dissolution de sulfate de cuivre additionnée d'acide sulfurique.

Pour peroxyder un kilogramme de minium, il faut 154 ampères-heure; quelle sera la quantité de sulfate de cuivre décomposée par ce courant? D'après la théorie électro-chimique, nous avons la formule :

$$\frac{\text{Poids de sulfate de cuivre décomposé}}{\text{154 ampères-heure}} = \frac{63 + 32 + 64}{26\,402 \times 2} =$$

$$= \frac{24\,486}{52\,804} = 0^{k.},463^{gr.}.$$

Il suit de là que lorsqu'un kilogramme de minium aura été transformé en peroxyde, 463 grammes de sulfate de cuivre auront été décomposés.

Dans un tel accumulateur, il y a lieu de se préoccuper de la question du liquide. En effet, pour que la formation soit complète, quelle quantité de sulfate de cuivre le liquide devra-t-il contenir ?

On sait qu'une dissolution de sulfate de cuivre est saturée quand 250 grammes de ce sel sont dissous dans un litre d'eau, ce qui va donner sensiblement $1^{\text{litre}},250$.

La transformation d'un kilogramme de minium nécessite la décomposition de 463 grammes de sulfate de cuivre, ce qui correspond à $2^{\text{litres}},315$ de liquide.

Comme 1 kilogramme de minium nous donne 4 kilogrammes d'électrodes positives d'accumulateur, nous devons donc faire en sorte que par kilogramme d'électrode positive dans l'élément, l'on dispose d'un volume de liquide égal à $\frac{2,315}{4} = 0^{\text{litre}},579$.

2° Accumulateur au zinc. Si l'on remarque que le poids atomique du zinc est de 65, alors que celui du cuivre est de 63, et que la constitution chimique du sulfate de zinc, $ZnSO_4$, nous donne $65 + 32 + 64$, qui ne diffère que de 2 unités de la constitution du sulfate de cuivre, $63 + 32 + 64$, on conçoit que tout ce que nous avons dit de la formation des accumulateurs au cuivre est applicable, à peu de choses près, aux accumulateurs au zinc.

La formule

$$\frac{\text{Poids de sulfate de zinc décomposé}}{\text{154 ampères-heure}} = \frac{65 + 32 + 64}{26\,402 \times 2},$$

indique que 469 grammes de sulfate de zinc auront été décomposés quand 1 kilogramme de minium aura été transformé en peroxyde de plomb. En raisonnant comme ci-dessus, on trouve que 1 kilogramme d'électrode positive nécessite un volume de liquide égal à $0^{\text{litre}},586$.

§ 4.

CHARGE.

La charge des accumulateurs peut se faire avec une source quelconque d'électricité, pourvu que le courant soit continu ; les *piles primaires,* de même que les *machines magnéto-électriques* et les *machines dynamo-électriques* conviennent donc pour charger les accumulateurs.

La dépense des *piles primaires* étant fort grande, ce n'est que dans des cas tout à fait spéciaux qu'on devra les employer.

Les *machines magnéto-électriques* sont les générateurs les plus convenables. Il n'y a jamais à craindre, avec ces machines, de renversement des pôles, attendu que le sens du courant reste toujours le même. Malheureusement, à égalité de puissance, ces machines coûtent beaucoup plus cher que les *machines dynamo-électriques,* qui sont les plus répandues aujourd'hui.

Toutes les dynamo ne conviennent pas pour charger les accumulateurs; il faut que les électro-aimants de la machine soient excités par dérivation ou par une machine séparée.

Dans ces deux cas, il n'y a pas à craindre de renversement du courant, ce qui, au contraire, arrive très souvent quand on prend une machine excitée en circuit.

Le générateur le plus fréquemment adopté pour la

charge des piles secondaires est la dynamo excitée par dérivation.

La résistance d'une batterie d'accumulateurs n'est pas la même au commencement de la charge que dans la suite de cette opération. Comme l'excitation des électros dépend de cette résistance, il est utile d'introduire, dans le circuit des électros, une résistance variable.

Il est évident que, pour que la charge d'une batterie d'accumulateurs soit possible, la force électro-motrice de la machine chargeuse doit être plus grande que la force électro-motrice maxima que peut posséder la batterie complètement chargée. Si cette supériorité n'avait pas lieu, les accumulateurs se déchargeraient dans la machine.

Les accumulateurs électriques ont, en général, une très faible résistance intérieure. Si la résistance totale de toute la batterie n'est pas assez grande, on constate que les électros de la dynamo s'échauffent fortement. Il est nécessaire, dans ce cas, d'introduire, dans le circuit extérieur, une série de résistances qu'on modifie à volonté.

Nous allons essayer de résoudre le problème suivant :

Étant donnée une machine dynamo-électrique capable de produire un travail $W = \frac{EI}{9,81}$ . . . . (1), *exprimé en kilogrammètres par seconde, déterminer les conditions de la charge d'une batterie d'accumulateurs, au moyen de cette machine, pour que le travail utilisé soit maximum.*

Dans l'expression du travail, il y a deux facteurs, la force électro-motrice E et l'intensité I du courant, dont nous allons déterminer les valeurs en fonction des éléments de la batterie, de l'intensité du courant qui traverse ces éléments et des constantes des accumulateurs.

Supposons que l'intensité du courant engendré I soit assez grande pour que nous puissions charger plusieurs séries d'accumulateurs réunies en quantité.

Soit un nombre total d'éléments $A = ab$ . . . . (2), formule dans laquelle a représente le nombre de séries et b le nombre d'accumulateurs entrant dans chaque série.

Le courant I ne passe pas entièrement dans chaque série; comme celles-ci, au nombre de a, sont réunies en quantité, il ne passera dans chacune d'elles qu'un courant ayant une intensité

$$I' = \frac{I}{a}, \quad \text{d'où :} \quad I = I'a \ldots . \qquad (3)$$

Quelles sont les actions exercées par le courant électrique sur les accumulateurs de chaque série ?

Avant de commencer la charge, les électrodes des accumulateurs sont dans un état inerte; mais lorsque le courant commence à passer, la décomposition électrolytique qu'il produit s'effectue de telle manière que chaque électrode se charge à un certain potentiel électrique; l'accumulateur acquiert ainsi une certaine force électro-motrice qui va rapidement en augmentant et atteint bien vite une valeur maxima qu'il conserve pendant presque tout le temps que la charge se prolonge.

Si e désigne cette valeur maxima d'un accumulateur,

comme il y en a b dans chaque série, la force électro-motrice des diverses séries sera donc égale à be.

Ainsi donc, le courant de la dynamo a effectué une décomposition électrolytique, et, pour vaincre les affinités chimiques en chargeant les accumulateurs de la batterie, la force électro-motrice de la dynamo a dû être au moins égale à be.

Mais indépendamment de cette action qui a pour effet de vaincre les résistances actives, la force électro-motrice de la dynamo doit encore vaincre les résistances intérieures de la batterie.

Quelle devra donc être la force électro-motrice de la dynamo nécessaire pour vaincre la résistance intérieure de toute la batterie ?

Soit r la résistance intérieure d'un élément ; puisqu'il y en a b dans chaque série, la résistance d'une série sera br, et comme il y a a séries groupées en quantité, la résistance totale R des a séries de la batterie sera $\frac{br}{a}$. Pour faire passer à travers cette résistance un courant de I ampères, il faudra une force électro-motrice

$$E' = I\frac{br}{a} \ldots\ldots, \qquad (4)$$

et en vertu de (3) :

$$E' = aI'\frac{br}{a} = brI' \ldots\ldots \qquad (5)$$

Les deux termes provenant des résistances à vaincre sont be et brI' ; nous aurons ainsi :

$$E = be + brI' \ldots\ldots \qquad (6)$$

Nous allons remplacer dans la formule (1) E et I par

leur valeur donnée par les équations (3) et (6); on a alors :

$$W = \frac{(be + brI')\,I'a}{9,81} = \frac{AeI' + ArI'^2}{9,81} \quad \ldots \quad (7)$$

En déterminant la valeur de E, nous avons reconnu qu'il y avait deux genres d'actions produites par l'énergie électrique de la dynamo, les unes utiles et les autres perdues.

Les actions utiles nécessitaient la force électro-motrice *be*, et si nous prenons dans l'équation (7) le travail correspondant à ces actions, nous voyons qu'il est égal (c'est le premier terme) à :

$$W_1 = \frac{AeI'}{9,81}.$$

C'est ce travail qui concourt à l'emmagasinement; c'est lui qui sert à vaincre les résistances actives, c'est-à-dire les affinités chimiques.

Quant au deuxième terme de l'équation (7),

$$W_2 = \frac{ArI'^2}{9,81},$$

il représente le travail perdu, c'est lui qui sert à échauffer les éléments et ne concourt nullement à l'emmagasinement de l'énergie électrique.

Nous devons chercher à réduire ce travail au minimum, et pour y arriver, on voit que A restant constant, il faudra rendre aussi petits que possible :

1° la résistance intérieure de l'accumulateur, et 2° le courant de charge de chaque série de la batterie.

Si nous déterminons le rapport du travail utile W_1 au travail perdu W_2, nous avons :

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\frac{AeI'}{9,81}}{\frac{ArI'^2}{9,81}} = \frac{e}{rI'}.$$

Ce rapport devant être le plus grand possible, on reconnaît que les conditions de charge les plus favorables sont les trois suivantes :

1° L'accumulateur doit avoir la plus grande force électro-motrice e;

2° La résistance intérieure r des éléments doit être la plus petite possible ;

3° Le courant de charge de chaque série doit être réduit à une très faible valeur.

En pratique, chaque accumulateur a une force électro-motrice et une résistance intérieure parfaitement déterminées.

Des trois conditions auxquelles nous sommes arrivés, il ne reste plus que la troisième qui montre que la charge des accumulateurs doit se faire avec un courant de faible intensité.

Que doit-on entendre par courant de faible intensité?

L'expérience prouve que si l'intensité est trop faible pour la capacité, pour le poids des couples secondaires, la charge ne se fait pas. Si cette intensité est trop forte, l'électrolyse se produit avec une telle abondance que les éléments qui en résultent ne parviennent pas à se combiner, en assez grande quantité, avec les électrodes, et les gaz se dégagent alors à la surface du bain. Il s'ensuit que le rendement est alors affaibli.

L'expérience montre que les charges variant de

0,25 ampère à un ampère maximum par kilogramme d'électrode, sont des limites qu'on peut avantageusement admettre.

Les calculs que nous avons faits, pour arriver à la solution du problème, ont une certaine utilité, comme nous allons le voir.

Exemple numérique. — Une machine dynamo-électrique est capable de donner 100 volts et 50 ampères. On désire charger des accumulateurs d'un poids de 10 kilogrammes. Déterminer la valeur du travail utile qui pourra être emmagasiné dans la batterie.

Considérons d'abord le cas des *accumulateurs à base de plomb,* dont la résistance intérieure est d'environ $0^{\text{ohm}},01$.

Les données qui précèdent permettent de poser :

$$E = 100,$$
$$I = 50,$$
$$r = 0,01.$$

La valeur maxima de la force électro-motrice d'un accumulateur au plomb, obtenue par une charge effectuée dans de bonnes conditions, ne dépasse guère dix pour cent de sa valeur normale 2,15[1]; faisons donc $e = 2,35$.

---

1. J'ai presque toujours constaté que la majoration de e était plus grande avec les accumulateurs à dépôt naturel qu'avec les accumulateurs à dépôt artificiel; j'attribue ce fait à ce que, la matière active étant plus divisée dans ces derniers, les constituants électrolytiques exercent leur action, d'une façon plus effective, dans l'intérieur de la masse spongieuse.

Nous allons admettre un régime de charge de un ampère par kilogramme d'électrode. La machine donnant 50 ampères, et chaque élément de $10^{k.}$ ne pouvant recevoir qu'une charge de 10 ampères, on voit que nous aurons un nombre de séries groupées en quantité égal à $\frac{50}{10} = 5$.

Ainsi, nous avons déjà $I' = 10$; $a = 5$.

Il reste à connaître le nombre d'éléments entrant dans chaque série. La formule (6) :

$$E = be + brI',$$

nous donne :

$$100 = b \times 2{,}35 + b \times 0{,}01 \times 10,$$

d'où :

$$b = \frac{100}{2{,}35 + 0{,}1} = 40.$$

Le nombre total d'éléments sera donc

$$A = ab = 5 \times 40 = 200,$$

et le poids de la batterie toute entière,

$$P = 200 \times 10^{k.} = 2\,000^{k.}.$$

Le travail total,

$$W = \frac{EI}{9,81} = \frac{100 \times 50}{9,81} = 509 \text{ kilogrammètres,}$$

peut produire un travail utile d'emmagasinement :

$$W_1 = \frac{AeI'}{9,81} = \frac{200 \times 2{,}35 \times 10}{9{,}81} = 479 \text{ k}^{\text{gmt.}}.$$

La différence 509 — 479 = 30 kilogrammètres, soit 6 p. c. seulement, représente le travail perdu.

On voit donc que l'emmagasinement d'un travail électrique produit par une dynamo chargeuse peut se

faire dans de très bonnes conditions, puisqu'on ne perd que 6 p. c. de l'énergie engendrée par la dynamo.

Il y a cependant une remarque à faire. Lorsque nous avons admis $e = 2^{v},35$, nous avons été forcés de tenir compte de l'augmentation de la force électro-motrice résultant des produits surhydrogénés et suroxydés qui se forment, autour des électrodes, sous l'action du courant primaire. Or, quand il s'agira de la décharge, nous verrons que la valeur normale de la force électro-motrice utilisable d'un accumulateur à base de plomb n'est que de $2^{v},15$; il s'ensuit donc que le travail réellement utile n'est pas de 479 kilogrammètres, mais bien de :

$$W_1 = \frac{AeI'}{9,81} = \frac{200 \times 2,15 \times 10}{9,81} = 438 \text{ kilogrammètres.}$$

La différence 509 — 438 = 71 kilogrammètres, soit 14 p. c., constitue le travail non utilisé.

S'il s'agit, au lieu d'accumulateurs à base de plomb, d'accumulateurs au cuivre ou au zinc, quelle sera la valeur du travail utile, en supposant que les conditions de charge rappelées au problème ci-dessus restent les mêmes.

Accumulateurs au cuivre. On peut admettre que la force électro-motrice utilisable, pendant la décharge, d'un accumulateur au cuivre est de $1^{volt},25$, tandis que si l'on admet un courant de charge de 1 ampère par kilogramme d'électrode, on devra assigner, pendant la charge, à e une valeur de $1^{v},45$. Quant à la résistance r, nous pouvons la considérer égale à $0^{ohm},06$.

I' étant égal à 10 ampères, $a = \frac{I}{I'} = \frac{50}{10} = 5$, c'est-à-dire qu'il y aura encore 5 séries en quantité.

Quant au nombre d'éléments compris dans chaque série, on a :

$$E = be + brI', \quad \text{d'où :} \quad b = \frac{100}{1,45 + 0,6} = 66.$$

Le nombre total d'éléments de la batterie sera :

$$A = ab = 5 \times 66 = 330,$$

et le poids de la batterie :

$$P = 330 \times 10^{k.} = 3\,300^{k.}.$$

Le travail total,

$$W = \frac{EI}{9,81} = \frac{100 \times 50}{9,81} = 509 \text{ kilogrammètres,}$$

est capable de donner un travail utile,

$$W_1 = \frac{AeI'}{9,81} = \frac{330 \times 1,45 \times 10}{9,81} = 488 \text{ k}^{\text{gmt.}}.$$

Le travail perdu est représenté par la différence $509 - 488 = 21$ k$^{\text{gmt.}}$, soit 4 p. c.

Il y a lieu, comme dans l'accumulateur précédent, de tenir compte de la surélévation de la force électro-motrice pendant la charge. Ainsi, de $1^{v.},45$, la force électro-motrice retombe à $1^{v.},25$ pendant la décharge, de sorte que W_1 n'est pas égal, en réalité, à 488 kilogrammètres, mais

$$W_1 = \frac{330 \times 1,25 \times 10}{9,81} = 420 \text{ kilogrammètres.}$$

La déperdition est donc de $509 - 420 = 89$ kilogrammètres, soit 17 p. c.

Accumulateurs au zinc. La force électro-motrice maxima, pendant la charge, est de 2,44 ; elle descend à 2,36 pendant la décharge.

Résistance intérieure d'un élément : $r = 0{,}06$.

Courant de charge passant dans chaque série :

$$I' = 10.$$

Nombre de séries : $a = \frac{50}{5} = 5$.

Éléments entrant dans chaque série :

$$b = \frac{100}{2{,}44 + 0{,}6} = 40.$$

Nombre total d'éléments de la batterie :

$$A = 5 \times 40 = 200.$$

Poids total : $P = 200 \times 10^{k.} = 2\,000^{k.}$.

Travail total :

$$W = \frac{EI}{9{,}81} = \frac{100 \times 50}{9{,}81} = 509 \text{ kilogrammètres.}$$

Travail utile :

$$W_1 = \frac{AeI'}{9{,}81} = \frac{200 \times 2{,}44 \times 10}{9{,}81} = 497 \text{ kilogrammètres.}$$

Travail perdu : 509 — 497 = 12 kilogrammètres, soit 2 p. c.

En prenant $e = 2{,}36$, qui est la force utilisable pendant la décharge :

$$W_1 = \frac{200 \times 2{,}36 \times 10}{9{,}81} = 481 \text{ kilogrammètres.}$$

Travail réellement perdu : 509 — 481 = 5 $k^{gmt.}$, soit 5 p. c.

Les calculs qui précèdent s'appliquent à un cas tout

à fait pratique. Nous avons pris dans ces calculs la limite supérieure de charge généralement admise, un ampère par kilogramme d'électrode; si l'on avait adopté $\frac{1}{2}$ ampère, le nombre de séries eût été double et la surélévation de la force électro-motrice pendant la charge beaucoup moins élevée.

Ainsi, au lieu de $2^{v.},35$, $1^{v.},45$ et $2^{v.},44$ que nous avons admis dans nos calculs, ces chiffres eussent été réduits respectivement à $2^{v.},25$, $1^{v.},35$ et $2^{v.},4$. On conçoit que dans ces conditions on obtienne un travail utile plus grand : les déperditions seraient inférieures à 14 pour cent, 17 pour cent et 5 pour cent. En examinant ces 3 derniers chiffres, on reconnaît que l'accumulateur au zinc est celui qui, sous l'influence de la charge, permet d'obtenir le plus grand travail d'emmagasinement utile.

Conservation de la charge. Lorsqu'un accumulateur est bien formé, il peut conserver sa charge pendant très longtemps. Il est difficile d'indiquer rigoureusement la loi que suit la perte résultant d'une décharge retardée. Cela dépend uniquement du degré de formation des éléments. « Nous avons obtenu, dit Planté, des effets avec des couples exceptionnellement bien formés, plus d'un mois après les avoir soumis à l'action du courant primaire. »

M. Fontaine, qui a procédé à des expériences sur des accumulateurs de Kabath, a trouvé que « après six heures de repos, un accumulateur rend 2 p. c. en moins.

« Après une journée de repos, 5 p. c. en moins.

« Après 8 jours, 20 p. c. en moins.

« Ces chiffres se rapportent au cas d'une décharge complète, faite après ce temps. Si la décharge se fait en plusieurs fois; si, par exemple, on décharge des accumulateurs en huit fois pendant une heure chaque jour, la perte est de 10 p. c. au lieu de 20 p. c. »

Nous ne pouvons, pour notre part, donner de règle au sujet de la conservation de la charge. Nous avons parfois trouvé des choses si singulières que, pratiquement, il est impossible de dire rigoureusement comment se comportera *chacun* des accumulateurs faisant partie d'une batterie. Ce qui ressort surtout de nos expériences, c'est que les accumulateurs bien formés peuvent conserver une partie de la charge pendant plus de deux mois. Il nous est arrivé que des appareils formés en même temps et chargés ensemble se comportaient d'une façon très différente lorsqu'on les laissait reposer pendant quelques semaines.

Ce qui précède, relativement à la conservation de la charge, ne s'applique qu'aux accumulateurs à base de plomb. Les accumulateurs au cuivre ne nous ont jamais rien donné, un mois après avoir été chargés. Quant aux accumulateurs au zinc, la durée de la conservation est excessivement réduite; ce qui s'explique, d'ailleurs, si l'on songe aux actions locales qui font travailler l'accumulateur en circuit ouvert comme en circuit fermé.

Durée de la charge. Supposons que les accumulateurs soient formés. Si l'on veut que les appareils aient une durée de service admissible dans l'industrie, il ne faut pas surcharger les accumulateurs. Connaissant la capacité d'emmagasinement que peuvent posséder les divers éléments, nous croyons qu'il est utile de ne pas faire absorber un nombre de coulombs supérieur de 1/10 à celui que ces éléments sont capables de restituer.

§ 5.

DÉCHARGE.

La décharge des accumulateurs dépend essentiellement de la résistance du circuit extérieur, ou, si l'on veut, en vertu de la loi de Ohm, $I = \frac{E}{r + R}$, de l'intensité du courant.

M. Niaudet a donné, pour les piles primaires, un excellent diagramme qui représente, d'une façon très claire, les variations que peuvent subir : 1° le travail total, 2° le travail utile, et 3° le rendement, lorsqu'on modifie l'intensité du courant de la pile.

Ce diagramme s'applique complètement aux accumulateurs; c'est pourquoi nous le reproduisons ici : c'est la figure 23.

Nous allons en donner l'interprétation, en suivant l'exposé de la question par Niaudet.

Lorsque la pile primaire ou secondaire est fermée sur elle-même et que la résistance extérieure peut être considérée comme nulle, le débit est maximum et l'intensité $I = \frac{E}{r}$. La force électro-motrice E et la résistance intérieure r sont *deux constantes* de l'appareil. Dans ce cas, le travail électrique est nul dans le circuit extérieur; il sert uniquement à chauffer la pile inutilement.

Si l'on veut avoir le maximum de l'expression $I = \frac{E}{r + R}$, il faut faire $r = R$; le travail disponible

dans le circuit extérieur est alors maximum et l'intensité $I' = \frac{E}{2r}$.

L'équation $I = \frac{E}{r + R}$ est celle d'une hyperbole équilatère dont les asymptotes sont l'axe des X et un axe des Y secondaire, Y'O'Y'', tel que $OO' = r$.

D'après les travaux de Joule, lorsque tout le travail produit est calorifique, le travail total $Tt = \frac{E^2}{r + R}$ et le travail utile $Tu = E^2 \frac{E}{(r + R)^2}$.

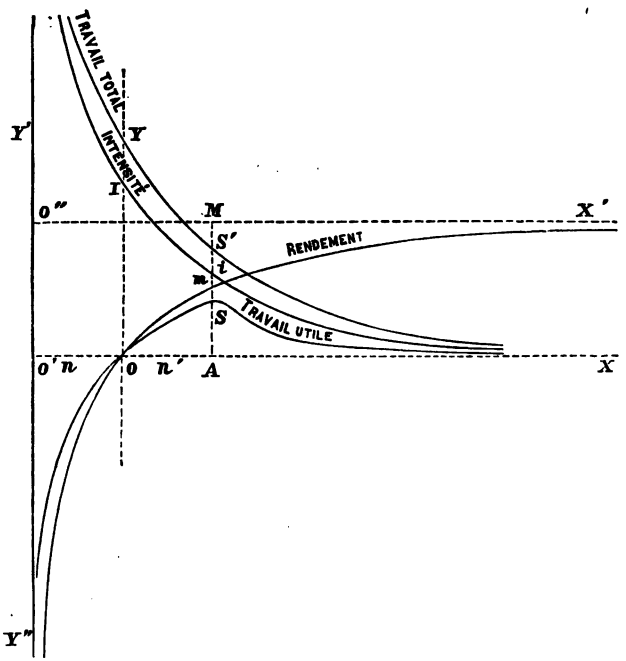

Fig. 23.

Le travail total $Tt = \frac{E^2}{r + R}$ est représenté par une

hyperbole équilatère dont les asymptotes sont les mêmes que celles relatives à la courbe des intensités.

Le travail utile $Tu = E^2 \frac{R}{(r + R)^2}$; c'est l'équation d'une courbe du troisième degré passant par l'origine et asymptotique, d'une part, à l'axe des X, et, d'autre part, à O'Y''.

Enfin, le rendement $\frac{Tu}{Tt} = \frac{R}{r + R}$ est l'équation d'une hyperbole équilatère qui passe par l'origine et dont les asymptotes sont un axe parallèle à l'axe des X, tel que O'O'' = 1, et l'axe O'Y''.

Ce dont il faut surtout se préoccuper dans les applications industrielles, c'est de la question du rendement. L'examen de la figure montre que le rendement A*m* est égal à 1/2, quand OA = OO', soit R = *r*, c'est-à-dire quand la résistance extérieure est égale à la résistance intérieure. On voit que, dans ce cas, le travail utile AS est la moitié du travail total AS' et que l'intensité A*i* est moitié moindre qu'elle n'est pour R = O.

A droite du travail utile maximum se trouve la région favorable dans laquelle le rendement augmente et l'intensité diminue; tandis qu'à gauche du même point est la région défavorable dans laquelle le rendement diminue, alors que l'intensité augmente.

Or, nous savons que si l'intensité I augmente, alors que E et *r* restent constants, la résistance extérieure, au contraire, diminue et inversement.

Ce qui précède nous montre donc que si l'on veut obtenir, pour le rendement des accumulateurs, une valeur élevée, il faut que la résistance extérieure soit

la plus grande possible, ou bien que l'intensité du courant de décharge soit aussi faible que possible.

Il y a lieu de remarquer que cette conclusion est également commandée par un autre phénomène inhérent à la nature chimique des accumulateurs : nous voulons parler de la *polarisation*.

Chaque espèce d'accumulateur a un *débit de régime* qui dépend de sa capacité et de la nature des éléments chimiques qui entrent dans sa composition. C'est à l'expérience à faire connaître le débit de régime qui convient à chaque type. On ne peut guère fixer que des limites en dessous desquelles il est utile de rester, si l'on veut obtenir pour la décharge un rendement *continu* satisfaisant.

Plus faible sera le débit de décharge et plus considérable sera la valeur du rendement ; mais dans la plupart des applications, on ne peut se contenter de ces décharges effectuées avec une lenteur extrême. Néanmoins nous croyons devoir dire que l'expérience nous a toujours prouvé qu'avec des éléments dont le poids des électrodes était au minimum de 2 kilos, il ne fallait pas dépasser, avec des accumulateurs à base de plomb, un ampère par kilogramme d'électrode.

Quand on se sert d'accumulateurs à dissolution saline, on peut prendre un chiffre supérieur à un ampère, parce que la polarisation se fait moins sentir.

Ainsi, les accumulateurs au cuivre donnent de bons résultats quand on ne dépasse pas 2 ampères par kilogramme d'électrode.

Les accumulateurs au zinc permettent d'aller encore plus loin, et on peut admettre, avec ces accumulateurs, un débit de régime de 3 ampères par kilo.

Il existe certaines considérations qu'il est utile de connaître.

Nous avons déjà dit que, pendant la charge des accumulateurs, la force électro-motrice des éléments est supérieure à celle qu'ils possèdent normalement pendant la décharge.

Supposons qu'une machine dynamo éclaire une série de lampes, alors que le courant de la machine passe par une batterie d'accumulateurs. On se sert, par exemple, de couples secondaires au plomb. En majorant de dix p. c. la valeur de la force électro-motrice des éléments, on devra compter que chaque couple possédera pendant la charge une force électro-motrice de

$$2{,}15 + 0{,}21 = 2^{\text{v}}{,}36.$$

S'il s'agit de produire dans le circuit extérieur une force électro-motrice de $94^{\text{v}}{,}4$, on groupera en tension quarante éléments. Or si, à un moment donné, on supprime le courant de la dynamo, les accumulateurs devant seuls pourvoir à l'énergie réclamée dans le circuit extérieur, que va-t-il arriver ?

Comme la force électro-motrice des éléments, quelques minutes après avoir enlevé le courant primaire, n'est plus que de $2^{\text{volts}}{,}15$, la différence de potentiels réclamée dans le circuit nécessitera :

$$\frac{94{,}4}{2{,}15} = 43{,}8, \text{ soit } 44 \text{ éléments.}$$

Il s'ensuit donc qu'au lieu de se contenter de charger 40 couples, on devra effectuer la charge sur 44.

Au moment où on supprime le courant primaire, il est clair qu'on arrivera facilement, au moyen d'un commutateur, à introduire dans le circuit un, deux, trois, puis quatre éléments, de manière à maintenir sensiblement la différence de potentiels. Mais ce procédé serait défectueux, en ce sens que les quatre éléments ne devraient pas fournir la même somme de travail que les quarante premiers, et les charges répétées surchargeraient souvent les quatre couples, ce qui les mettrait assez rapidement hors de service.

Le meilleur moyen à employer dans un cas semblable consiste à intercaler, dès l'origine, une série de résistances fixes que l'on introduirait *crescendo* pendant la charge et *diminuendo* pendant la décharge.

Lorsque nous étudierons les applications des accumulateurs, nous verrons qu'on ne peut pas toujours compter, pendant la décharge, sur une force électromotrice de $2^{v},15$ par accumulateur au plomb bien formé. Il y a lieu de tenir compte d'une diminution de cette force qui va en croissant avec l'intensité du courant de décharge. Les exemples que nous donnerons alors feront aisément saisir ce qui précède.

Les 2 diagrammes ci-après, donnés par MM. Fichet, Hospitalier et Jousselin, montrent bien les variations de la décharge des accumulateurs, suivant que le régime initial de décharge satisfait ou ne satisfait pas aux considérations que nous avons développées plus haut.

La figure 24 indique la décharge d'une série de quatre accumulateurs, le régime initial étant de 44 ampères, et la figure 25 représente celle d'un accumulateur du même type, le régime initial n'étant que de 13 ampères. La charge était pleine pour le cas de la figure 24, et elle n'atteignait, dans le second cas, que la moitié environ de celle qu'il était susceptible de recevoir.

Ces diagrammes montrent l'influence d'un débit plus

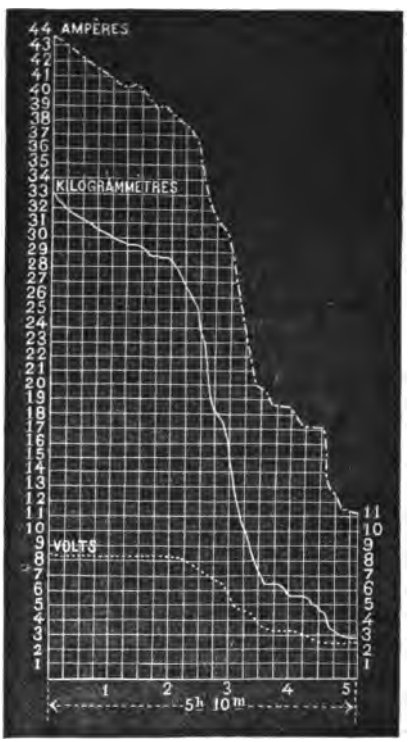

Fig. 24.

ou moins rapide sur la somme totale d'énergie électrique qu'on peut obtenir. Il y avait entre la charge et la décharge un repos de 24 heures.

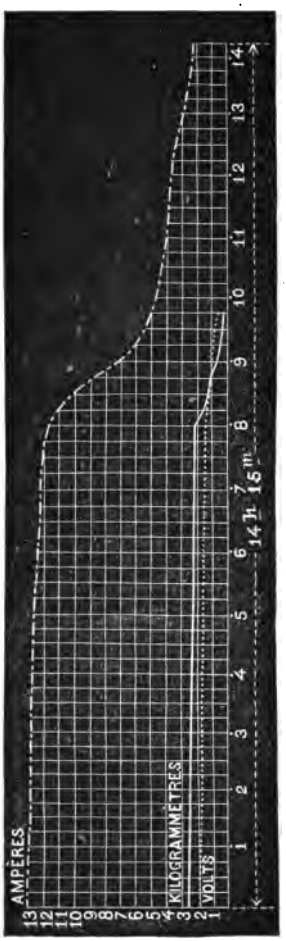

Fig. 25.

§ 6.

RENDEMENT.

Aussi longtemps qu'une invention reste dans le domaine de la science et du laboratoire, les discussions qu'elle fait naître se développent d'une façon sérieuse. L'on cherche tout d'abord à poser les questions aussi nettement que possible, et chacun apporte à la solution des problèmes une opinion sincère, en s'appuyant sur des résultats d'expérience. Mais si, par suite de circonstances spéciales, l'on entrevoit que cette invention peut jouer, dans l'industrie, un rôle relativement important, alors la finance s'en empare, et comme il arrive fréquemment que les spéculations financières reposent sur des moyens dont la loyauté est malheureusement trop contestable, l'on semble s'appliquer à embrouiller les questions et à retarder la démonstration des résultats acquis.

C'est ce qui s'est produit au sujet des accumulateurs d'électricité.

Comme le dit avec beaucoup de raison M. de Parville, on agit plus qu'on ne parle dans les laboratoires, et en dehors du monde savant, on s'était bien peu préoccupé de l'accumulateur Planté qui datait cependant de 1859.

Les résultats relatifs au rendement des accumulateurs obtenus par cet éminent physicien n'avaient jamais été contestés, parce que ceux qui s'étaient livrés

à des expériences prolongées sur les piles secondaires à base de plomb, appartenaient à cette catégorie de travailleurs, amis de la science, qui n'avaient pas tardé à reconnaître la justesse des appréciations émises par M. Planté.

Ce n'est qu'à la suite des expériences qui furent faites sur les accumulateurs Faure, au Conservatoire des arts et métiers, à Paris, par MM. Tresca, Allard, Le Blanc, Joubert et Potier, que le rendement et partant l'utilité des accumulateurs, commencèrent à être attaqués.

Certains électriciens, parmi lesquels on cite des noms qui jouissent, dans la science, d'une réelle autorité, entreprirent une campagne insensée contre les accumulateurs, parce que, disait-on, le rendement n'atteignait que 40 p. c., chiffre que la grande partie du public regarde encore actuellement comme étant le rendement maximum de ces appareils.

Il suffira, pensons-nous, de donner quelques explications au sujet des expériences du Conservatoire des arts et métiers, pour faire voir quelle étrange confusion il existe dans l'interprétation de la vraie valeur du rendement.

Trente-cinq accumulateurs Faure furent chargés au moyen d'une machine dynamo-électrique du système Siemens, actionnée par une machine à vapeur qui a fourni 9 570 000 kilogrammètres.

La dynamo Siemens a seulement reproduit un travail de charge effectif de 6 382 000 kilogrammètres. Par

conséquent, le rendement de la machine électrique n'a été que de $\frac{6\,382\,000}{9\,570\,000} \times 100 = 60$ p. c. Il est bien vrai que, par suite de la trop faible résistance des électros de la dynamo, on a introduit dans le circuit une résistance qui doit augmenter ce rendement d'environ 10 p. c.

Le travail récupéré par la machine électrique, soit 6 382 000 kilogrammètres, a servi à charger les accumulateurs. Ceux-ci ont ensuite été déchargés sur douze lampes Maxim en deux fois, avec un intervalle de 36 heures.

La décharge a duré 10 heures 40 minutes avec un courant moyen de $16^{\text{ampères}},12$, sous un potentiel de $61^{\text{volts}},45$, ce qui correspond à un travail électrique de 3 809 000 kilogrammètres.

Comparons ce travail, d'une part, à celui dépensé par le moteur à vapeur et, d'autre part, au travail de charge; nous avons :

$$\frac{3\,809\,000}{9\,570\,000} \times 100 = 40 \text{ p. c.}$$

et

$$\frac{3\,809\,000}{6\,382\,000} \times 100 = 60 \text{ p. c.}$$

Le chiffre de 40 p. c. est celui dont on a voulu faire étalage pour discréditer les accumulateurs électriques; et, cependant, peut-on raisonnablement considérer ce chiffre comme représentant la vraie valeur du rendement des accumulateurs? Évidemment non.

Si l'on demande à un industriel quel est le rendement d'un appareil quelconque dont il se sert dans son usine, il répondra invariablement : Le rendement est

le rapport du travail restitué par l'appareil à celui qui est dépensé pour le faire fonctionner.

Si, pour mettre en activité cet appareil, on doit recourir à une machine à vapeur, en passant par des intermédiaires, le rendement n'en reste pas moins le même, et il est clair qu'on ne pourra jamais prendre pour sa valeur le rapport du travail restitué par l'appareil à celui qui est produit par la vapeur sur le piston de la machine et mesuré à l'indicateur de Watt.

En effet, il est clair que chacun des intermédiaires absorbe une partie du travail en pure perte; or, si l'on tient compte de ces pertes, on finit par trouver pour l'appareil définitif une quantité très minime du travail produit par la vapeur sur le piston, ce qui donnera, en prenant le rapport en question, un rendement tout à fait insignifiant.

Il est incontestable qu'il en est rigoureusement de même pour les accumulateurs électriques.

Le rendement des accumulateurs ne peut être que *le rapport du travail électrique restitué par la décharge au travail électrique qui a servi à la charge.*

Ainsi, en examinant les chiffres trouvés ci-dessus, on constate que le véritable rendement des accumulateurs, *en travail,* a été de 60 pour cent.

Un point d'une grande importante sur lequel il est utile d'attirer l'attention, c'est qu'à la fin des dix heures quarante minutes, la batterie était loin d'être déchargée entièrement. La diminution d'intensité lumineuse provenait uniquement du phénomène de la polarisation qui

résultait de ce que le circuit extérieur présentait une trop faible résistance.

Les 12 lampes Maxim étant groupées en dérivation, il s'ensuit que si la résistance d'une lampe est de 60 ohms, la résistance du circuit extérieur (abstraction faite de la résistance des conducteurs) sera de $\frac{60}{12} = 5$ ohms seulement. Cette résistance étant suffisante pour amener la polarisation de la batterie, il en résulte que la décharge *continue* prendra fin avant que l'appareil ne soit complètement épuisé ; mais, au contraire, si on avait modifié la résistance extérieure de manière à diminuer cette polarisation, ce qui aurait eu lieu en réduisant le nombre de lampes, par exemple, on aurait recueilli un travail supérieur à 3 809 000 kilogrammètres et, par conséquent, le rendement de 60 pour cent se fût accru en proportion.

Écoutons maintenant M. Planté :

« Le travail le plus directement effectué par le courant voltaïque étant un travail chimique, nous avons comparé la somme de toutes les actions chimiques produites, pendant la charge, à celles des actions du même genre produites pendant la décharge. En comparant le travail chimique total *rendu* par le couple secondaire, pendant sa décharge, avec le travail chimique total dépensé, pendant la charge, nous avons trouvé que la proportion ou *rendement* était de $\frac{88}{100}$ à $\frac{89}{100}$. »

Nous sommes bien loin, comme on le voit, des chiffres de 40 pour cent et 60 pour cent, renseignés plus haut.

On s'étonnera, sans doute, de la grande différence

qui existe entre ces résultats. Nous allons essayer d'en donner l'explication, en recherchant en même temps quelle peut être la valeur maxima du rendement des accumulateurs électriques.

Considérons une dynamo fournissant un travail,

$$W = \frac{EI}{g},$$

exprimé en kilogrammètres par seconde et chargeant une batterie d'accumulateurs électriques. Dans cette formule, nous voyons que deux facteurs, la force électro-motrice et l'intensité, interviennent pour déterminer la valeur de W.

Indépendamment des déperditions qui peuvent affecter chacun de ces éléments, il y a lieu de remarquer (voir l'article : *Charge des accumulateurs*) qu'une partie de l'énergie électrique $W_2 = \frac{ArI'^2}{9,81}$ sert à l'échauffement de la batterie et ne concourt pas à l'emmagasinement.

Cette quantité dépend de la résistance intérieure des accumulateurs et de l'intensité du courant de charge.

Avec les types d'accumulateurs que l'on construit actuellement, on peut dire que dans de bonnes conditions de charge, *le coefficient utile d'emmagasinement* est égal à 0,95 pour les accumulateurs au plomb, 0,93 pour les accumulateurs au cuivre, et 0,96 pour ceux au zinc.

Nous aurons ensuite deux autres coefficients dont l'un que nous appellerons *le coefficient de pression,* se rapportera à la force électro-motrice, et l'autre, *le*

coefficient de quantité, se rapportera à l'intensité du courant, ou plutôt à la quantité d'électricité.

En général, la force électro-motrice est plus grande pendant la charge que pendant la décharge. La surélévation dépend de quatre choses : 1° du degré de formation de l'appareil; 2° de la force électro-motrice du courant de charge; 3° de l'intensité de ce dernier, et 4° de la durée de la charge.

J'ai procédé à de nombreuses expériences à l'effet de déterminer la grandeur de cette surélévation. J'ai tout d'abord constaté qu'il était impossible d'établir une règle rigoureuse, car la surélévation dépend avant tout du degré de formation qui est absolument trop variable.

L'observation m'a prouvé que la surélévation de la force électro-motrice, pendant la charge, ne dépasse pas 5 p. c. lorsque : 1° l'intensité du courant de charge n'atteint pas $0^{amp.},75$ par kilogr. d'électrode; 2° que la force électro-motrice est inférieure à 1 1/4 fois celle de la batterie, et 3° que la quantité d'électricité fournie par la charge est en dessous du point de saturation de l'appareil.

Mais si l'intensité et la force électro-motrice du courant de charge sont supérieures aux chiffres que je viens de citer, la valeur de la surélévation grandit et peut même atteindre 15 pour cent.

M. Reynier a mesuré le coefficient de pression des accumulateurs au plomb, au cuivre et au zinc, et il a trouvé :

Pour l'accumulateur genre Planté. . . . 0,95.

Pour l'accumulateur au zinc	. . . . .	0,98.
» » au cuivre	. . . . .	0,87.

Ces trois chiffres ne doivent pas être pris d'une façon trop générale ; ils ne peuvent s'appliquer que dans les conditions les plus favorables.

En ce qui concerne l'intensité du courant, ou plutôt la quantité d'électricité, il résulte de nombreuses expériences qui ont été faites, tant en France qu'en Angleterre et en Belgique, qu'un accumulateur à base de plomb est capable de restituer 0,88 à 0,90 de la quantité d'électricité employée à le charger.

J'ai constaté, en opérant sur des éléments en hélice, que ce chiffre était, à très peu de choses près, applicable à l'accumulateur au cuivre.

Quant à l'accumulateur au zinc, il est impossible de donner des chiffres précis, à cause de l'action locale qui se produit en circuit ouvert et qui, en circuit fermé, fait dépenser à l'appareil une somme d'électricité plus grande que celle qu'on lui demande.

En conséquence, nous pouvons dire que, théoriquement parlant, le *rendement maximum* des accumulateurs au plomb peut atteindre la valeur de

$$0{,}95 \times 0{,}95 \times 0{,}89 = 0{,}789,$$

et celui des accumulateurs au cuivre,

$$0{,}93 \times 0{,}87 \times 0{,}89 = 0{,}72.$$

Ces valeurs représentent les rendements maximum qu'il est possible d'obtenir ; mais, dans les applications industrielles, il se présente presque toujours des

circonstances spéciales qui réduisent forcément l'un des trois coefficients.

Ainsi il arrive, par exemple, que, eu égard au trop faible poids des accumulateurs d'une batterie, le courant de charge atteigne 2 et même 3 ampères par kilogr. d'électrode. On constate alors qu'il se forme, au sein des accumulateurs, une électrolyse considérable; les produits qui résultent de la décomposition électrolytique, ne peuvent se combiner complètement avec les électrodes, ce qui a pour conséquence de diminuer le coefficient de quantité.

Dans d'autres cas, c'est la force électro-motrice du courant de charge qui est trop grande pour le nombre d'accumulateurs à charger, et, dès lors, le coefficient de pression diminue à son tour.

Revenons aux expériences du Conservatoire des arts et métiers, et interprétons successivement les valeurs respectives du coefficient utile d'emmagasinement et des coefficients de pression et de quantité.

La différence de potentiels aux bornes de la machine était, en moyenne, de $92^{\text{volts}},25$, et l'intensité du courant de $8^{\text{amp.}},48$, alors que la décharge des accumulateurs s'effectuait sous une différence de potentiels de $61^{\text{volts}},45$ et une intensité de $16^{\text{amp.}},15$.

En ce qui concerne le coefficient utile d'emmagasinement. nous avons vu à l'article : *Charge des accumulateurs,* que du travail $W = \frac{EI}{g}$ fourni par une dynamo chargeuse, il y en avait une partie $W_1 = \frac{A_1 \cdot I'^2}{g}$ qui servait à l'échauffement de la batterie et ne concourait

pas à l'emmagasinement de l'énergie électrique.

Dans le cas des expériences du Conservatoire des arts et métiers, l'on a :

$$\left.\begin{array}{l} E = 92^{v.},25 \\ I = 8^{a.},48 \end{array}\right\} \quad W = \frac{92,25 \times 8,48}{9,81} = 79^{kgmt.},74.$$

$$\left.\begin{array}{l} A = 35 \text{ élém}^{ents} \\ I' = 8^{a.},48 \\ r = 0,06 \end{array}\right\} \quad W_s = \frac{35 \times 0,06 \times \overline{8,48}^2}{9,81} = 15^{kgmt.},08,$$

soit 18,9 pour cent.

Le coefficient utile d'emmagasinement est donc de 0,81.

Quant au coefficient de pression, il y a lieu de remarquer que le potentiel moyen de la charge était de $92^{v.},25$, ce qui, à raison de 35 éléments, nous donne une moyenne par élément de $\frac{92,25}{35} = 2^{v.},63$. Or, la force électro-motrice d'un accumulateur chargé a été trouvée égale à $2^{v.},15$, soit une différence de $2,63 - 2,15 = 0,48$, ce qui montre que le coefficient de pression a atteint une valeur de 0,81.

Enfin, il résulte des dites expériences que, entre la quantité d'électricité introduite dans la pile, 694 500 coulombs, et celle qui en est sortie, 619 000, il n'y a qu'une différence de 74 900 coulombs, correspondant à une perte proportionnelle de 0,108; le coefficient de quantité est donc de 0,892.

Le produit $0,81 \times 0,81 \times 0,892 = 0,60$ représente le travail récupéré pendant la décharge.

Ce résultat nous suggère les observations critiques suivantes :

La faible valeur du coefficient utile d'emmagasinement

dépend de la résistance électrique du type d'accumulateur qui a servi aux expériences. Dans les nouveaux types que l'on fabrique actuellement, cette résistance est beaucoup moins élevée et n'est guère supérieure à $0^{ohm},01$.

Le coefficient de pression est trop faible. En effet, l'on disposait d'une force électro-motrice de $92^{v.},25$ et on n'a groupé en tension que 35 éléments. Dans les conditions extrêmement avantageuses de la charge, envisagée au point de vue de l'intensité du courant (environ $0^{amp.},50$ par kilogramme d'électrode), il est incontestable que la surélévation de la force électromotrice de chaque accumulateur n'a pas été de 10 p. c. Admettons, pour un instant, ce chiffre de 10 p. c. La batterie complète aurait eu une différence de potentiels de $35\ (2,15 + 2,15 \times 0,10) = 82^{v.},60$. On aurait pu grouper 39 éléments au lieu de 35. Remarquons immédiatement que ces 4 éléments supplémentaires auraient augmenté le rendement en travail. Si 35 éléments ont fourni 3 809 000 kilogrammètres pendant la décharge, 39 en auraient produit 4 244 000 et le rendement de 0,60 se fût élevé à 0,66.

Il y a lieu d'ajouter l'observation suivante :

La force électro-motrice moyenne des accumulateurs pendant la décharge a seulement été de $\frac{61,45}{35} = 1^{v.},75$. Il est cependant prouvé que la force électro-motrice normale des accumulateurs, mis en expérience, était de $2^{v.},15$. D'où provient cette différence? Ceux qui ont expérimenté les piles secondaires savent que lorsqu'une

batterie se décharge sur une seule lampe, on peut compter que les accumulateurs ont une force électromotrice de $2^{v},15$; mais supposez que l'on introduise successivement une deuxième, une troisième, ... une dixième lampe dans le circuit extérieur, on ne tarde pas à constater que l'introduction de ces lampes (en dérivation) nécessite un accroissement de force électromotrice et que, pour maintenir la même intensité lumineuse, il est nécessaire d'ajouter à la batterie de nouveaux éléments. Nous en donnerons plus tard le motif, lorsque nous étudierons l'application des accumulateurs à l'éclairage. C'est pourquoi si, au lieu d'effectuer la décharge sur 10 lampes Maxim disposées en dérivation, on s'était contenté d'éclairer seulement 5 lampes, la valeur de $1^{v},75$ eût été augmentée.

Le coefficient de quantité a une valeur qui me paraît extrêmement élevée eu égard aux conditions dans lesquelles s'est effectuée la décharge. D'abord, l'intervalle de 36 heures laissé entre les deux jours de la décharge n'a pas été sans amener une déperdition naturelle que j'évalue à 4 pour cent. Ensuite, l'intensité du courant de décharge était fort élevée pour que celle-ci pût se faire dans de bonnes conditions. Aussi je me permets de faire des réserves quant à la valeur de 0,108 trouvée pour la perte, en ce sens qu'il y aurait lieu de connaître l'état dans lequel se trouvait la batterie avant la charge. La *réserve* que possédait la batterie avant la charge n'est-elle pas intervenue partiellement dans le chiffre de 6 196 000 coulombs qui sont sortis de la pile ?

Je ne veux pas dire qu'il est impossible d'obtenir un coefficient de quantité égal à 0,892, j'ai montré le contraire ci-dessus; mais je tiens seulement à exprimer le doute que ce coefficient ait été atteint dans les conditions de l'expérience du Conservatoire.

En résumé, si MM. Tresca, Allard, Le Blanc, Joubert et Potier s'étaient préoccupés autant de la force électro-motrice que de l'intensité du courant de charge, ils auraient obtenu, pour le rendement des accumulateurs électriques, une valeur assez satisfaisante.

Dans la note que ces Messieurs ont adressée à l'Académie des sciences, il est dit que « entre les deux cas (la charge et la décharge), les niveaux étaient dans le rapport de 3 à 2; cette différence de potentiel dans les deux phases distinctes est inévitable ».

Je me permettrai de faire remarquer que cette différence n'est pas inévitable du tout, et il suffit d'avoir expérimenté les piles secondaires pour s'en convaincre.

Il est regrettable que ce point ait été aussi négligé, car, comme nous le disions en commençant cet article, ce sont les résultats obtenus au Conservatoire des arts et métiers qui ont servi de point de départ aux attaques qui se sont fait jour concernant l'utilité des accumulateurs.

Dans le courant de l'année 1883, MM. Monnier et Guitton ont entrepris des expériences sur les accumulateurs Faure destinés à la traction des tramways. Les résultats auxquels ils sont arrivés sont les suivants :

1° La quantité totale d'électricité restituée par la décharge est égale à 84,34 pour cent de celle qui a été absorbée par la charge ;

2° La somme totale d'énergie restituée par la décharge est égale à 62,44 pour cent de celle qui a été dépensée par la charge.

Il s'ensuit donc que le coefficient de quantité est de 0,84. Il est inférieur de 8,05 à celui trouvé par la Commission du Conservatoire des arts et métiers, ce qui provient probablement de ce que le courant de charge, dans ces dernières expériences, était plus faible et, par conséquent, plus favorable que dans les expériences de MM. Monnier et Guiton.

Quant à la somme du coefficient utile d'emmagasinement et du coefficient de pression, elle s'obtient par l'équation $0,843 \times x = 0,624$, d'où : $x = \frac{0,624}{0,843} = 0,74$, chiffre supérieur à celui de la Commission, parce que la différence de potentiels, pendant la charge, a été mieux calculée que dans les expériences de la Commission.

MM. Fichet, Hospitalier et Jousselin attribuent aux accumulateurs un rendement de 0,63; le coefficient de pression étant, d'après eux, de 0,70 et le coefficient de quantité de 0,90.

J'ai essayé moi-même de déterminer la valeur du rendement des accumulateurs électriques. La première remarque que l'observation m'a suggérée, c'est que, pour obtenir un bon rendement avec les accumulateurs à dépôt naturel de matière active, il faut que la décharge

s'effectue sur une résistance beaucoup plus grande que lorsqu'on emploie des accumulateurs à dépôt artificiel.

En opérant d'une façon analogue à celle de la Commission des arts et métiers, c'est-à-dire en effectuant la décharge sur une série de lampes groupées en dérivation ou en tension, je suis parvenu à obtenir un rendement *en travail* de 70 p. c. avec des éléments à base de plomb. Les accumulateurs au cuivre m'ont fourni un rendement variant entre 62 et 65 p. c.

Il y a lieu de remarquer cependant que ces expériences étaient faites dans le but d'obtenir un rendement élevé. Les conditions de la charge et de la décharge étaient réglées en conséquence.

Toutefois, j'estime que, dans un grand nombre d'applications, il est possible d'obtenir normalement un rendement en travail de 70 pour cent avec les accumulateurs au plomb et 62 pour cent avec les accumulateurs au cuivre.

Nous croyons nécessaire d'ajouter, à ce qui précède, l'observation suivante :

Lorsqu'on décharge un accumulateur électrique, on constate que les dernières traces d'énergie emmagasinée ne sont libérées qu'avec une extrême lenteur; la force électro-motrice est alors aussi très réduite, de sorte qu'il est impossible en pratique de se servir de cette énergie. Il est donc nécessaire que l'accumulateur possède toujours une certaine *réserve*, afin que la force électro-motrice soit suffisante pour utiliser immédiatement l'électricité qu'on emmagasine. C'est, d'ailleurs,

de cette façon que nous avons procédé pour déterminer le rendement. Si l'on ne tient pas compte de cette observation, il est clair que la valeur du rendement se réduira, puisqu'on ne pourra pas utiliser les dernières traces d'énergie restant dans la batterie.

§ 7.

CAPACITÉ.

Nous allons d'abord étudier le problème de la capacité d'emmagasinement des accumulateurs au point de vue théorique.

Calculons le poids d'électrode qui devra entrer dans un accumulateur pour obtenir un travail de *un cheval-heure électrique*. Le travail W de un cheval-heure correspond à $3\,600 \times 75 = 270\,000$ kilogrammètres.

La formule générale du travail $W = \frac{QE}{g}$ devient donc $3\,600 \times 75 = \frac{QE}{g}$.

Dans cette expression, Q est donné en coulombs; si nous voulons avoir sa valeur en ampères-heure, il suffit de diviser Q par 3 600. On a ainsi :

$$Q \text{ (en coulombs)} = \frac{g}{E} \times 75 \times 3\,600,$$

$$\text{ou } Q \text{ (en ampères-heure)} = \frac{g}{E} \times 75 \times \frac{3\,600}{3\,600} = \frac{g}{E} \times 75.$$

Rappelons-nous la loi de la *décomposition chimique :* Le poids, en kilogrammes, des éléments mis en action, est à la quantité d'électricité, exprimée en ampères-heure, qui passe dans le courant, comme l'équivalent chimique de ces éléments est à 26 402, ce que nous avons traduit par l'équation :

$$\frac{P}{Q} = \frac{m}{26\,402}.$$

S'il s'agit de produire un travail de *un cheval-heure électrique,* nous venons de voir que

$$Q \text{ (en ampères-heure)} = \frac{g}{E} \times 75.$$

Nous écrirons donc :

$$\frac{P}{\frac{g}{E} \times 75} = \frac{m}{26\,402}; \text{ d'où : } P = \frac{g}{E} \times \frac{75 \times m}{26\,402}.$$

Cette dernière formule va nous permettre de déterminer le poids d'électrode nécessaire pour produire un cheval-heure.

Accumulateurs au plomb. Nous allons supposer que les éléments sur lesquels on raisonne soient parfaitement formés ; alors la force électro-motrice $E = 2^{v},15$.

Nous devons maintenant recourir à la théorie chimique des accumulateurs, à l'effet de savoir combien d'équivalents des divers éléments sont mis en jeu, pendant la décharge de l'appareil.

Cette théorie chimique, comme nous l'avons dit antérieurement, est excessivement complexe ; mais nous avons admis que l'action principale de l'électrolyse avait pour but d'oxyder le plomb Pb de l'électrode négative à l'état de PbO et de réduire le peroxyde PbO^2 à l'état de PbO.

L'électrode négative intéresse donc un équivalent de plomb et l'électrode positive un équivalent de PbO^2.

Nous savons bien qu'il y a des actions secondaires qui suivent immédiatement l'action principale, et que cette transformation secondaire a pour effet de sulfater le plomb, ce qui est une conséquence de la présence de l'acide sulfurique dans le liquide.

Mais il y a lieu de remarquer que cette action secondaire n'intéresse pas une nouvelle quantité de métal.

En effet, la sulfatation du plomb nécessite la production de $Pb\dot{O}$ pour chaque électrode. Aussi longtemps que la décharge oxyde Pb et PbO^2 à l'état de PbO, on peut obtenir une formation de sulfate ; mais dès que l'oxydation à PbO a pris fin, l'acide sulfurique est sans effet sur le métal lui-même. La sulfatation n'intéresse que les éléments qui ont subi les réactions chimiques après avoir intéressé les éléments que nous avons trouvés ci-dessus.

Si l'on voulait, d'ailleurs, se servir de l'équation de MM. Gaston, Tribe et Reynier, exprimant la décharge des accumulateurs au plomb :

$$Pb + 2SO^3 + Aq + PbO^2 = SO^4Pb + Aq + SO^4Pb,$$

il n'y aurait également ici que un équivalent de plomb et un de PbO^2 qui seraient intéressés, et cependant ces physiciens admettent que l'électrolyse a immédiatement pour effet de sulfater les deux électrodes.

Cela compris, la formule

$$P = \frac{g}{E} \times 75 \times \frac{m}{26\,402},$$

nous donne pour l'électrode négative un poids de plomb

$$P = \frac{9,81}{2,15} \times 75 \times \frac{103,5}{26\,402} = 1^{k.},341,$$

et pour l'électrode positive,

$$P = \frac{9,81}{2,15} \times 75 \times \frac{119,5}{26\,402} = 1^{k.},539,$$

soit un poids total de $2^{k.},880$.

Telle est la quantité de plomb et oxyde de plomb actifs nécessaire pour produire un cheval-heure électrique ; mais il est clair qu'à ce poids nous devons ajouter

celui du plomb conducteur et du plomb destiné à former la carcasse de l'électrode, ainsi que la queue de celle-ci. Si, pour la partie conductrice et la carcasse, on ne se servait pas d'une épaisseur de métal suffisante, on courrait le risque de voir l'appareil mis bien vite hors d'usage. On peut pratiquement dire qu'il est nécessaire de quadrupler le poids que nous avons trouvé ci-dessus, ce qui nous donnera : $2,880 \times 4 = 11^{k.},520$.

Nous n'avons considéré, dans ce qui précède, que le poids des électrodes; si l'on veut examiner le liquide au même point de vue, on reconnaît que deux équivalents d'acide sulfurique sont intéressés pour la sulfatation des électrodes, dans le cas où l'on admet une sulfatation; on a donc un poids d'acide sulfurique :

$$2P = 2 \times \frac{9,81}{2,15} \times 75 \times \frac{49}{26\,402} = 2 \times 0,635 = 1^{k.},270,$$

soit à peu près la moitié du poids de plomb actif.

La densité de cet acide est d'environ 1800; le poids, $P = 1^{k.},270$, correspond donc à environ $0^{litre},6$; or, comme le liquide est formé d'eau acidulée par l'acide sulfurique au 1/10 en volume, nous aurons un volume d'eau égal à :

$$9 \times 0,6 = 5^{litres},4, \text{ pesant environ } 5^{k.},4.$$

L'examen de ces chiffres suggère quelques observations.

Il résulte de la théorie que la sulfatation d'un poids d'électrode nécessaire pour produire un cheval-heure électrique, soit $2^{k.},682$, exige un volume de liquide égal à $10 \times 0^{l.},6 = 6$ litres. Ce dernier chiffre paraît

excessivement élevé. D'ailleurs, ici se pose une question importante. La sulfatation des électrodes constitue-t-elle une chose utile au bon fonctionnement de l'accumulateur? Cette question mérite d'être discutée.

Lorsqu'un accumulateur, genre Planté, est en voie de formation, l'expérience prouve que si *une partie seulement* de la pellicule active subit la sulfatation, les constituants électrolytiques ont une facilité plus grande de pénétrer à travers la couche spongieuse et atteindre ainsi une plus grande profondeur dans l'intérieur de l'électrode. C'est surtout à la surface extérieure du dépôt qu'apparaît le sulfate de plomb. Mais ce dernier est d'une nature peu agrégée et malheureusement, par l'usage, il se détache du support avec une trop grande facilité, car il entraîne toujours avec lui des particules de peroxyde actif, ce qui nécessite une formation continuelle de ce genre d'accumulateurs, comme nous l'avons vu antérieurement. Il est à remarquer que le peroxyde et le plomb réduit qui résultent de la transformation du sulfate produite par suite de la présence dans le liquide de l'acide sulfurique, ne font jamais suffisamment corps avec le métal des électrodes et se détachent au bout de quelques mois de fonctionnement. M. Planté faisait cette remarque dans une note qu'il publiait, le 5 janvier 1884, dans la « *Lumière électrique* ». Nous avons pu vérifier, dans ces dernières années, combien cette remarque était fondée, en opérant sur nos accumulateurs à fils parallèles. Cette couche de sulfate, qui prend naissance par le repos, finit par envahir toute la

surface extérieure de la couche spongieuse active, et lorsqu'on veut remettre, après quelques mois de repos, l'appareil en activité, on observe que la résistance est telle qu'il faut faire passer le courant pendant plusieurs heures avant d'obtenir un effet utile. En outre, au bout de deux ou trois jours, cette pellicule blanche tombe petit à petit par minces filaments, et c'est ainsi que la capacité de ce système d'accumulateurs n'atteint un chiffre bien élevé qu'après un laps de temps excessivement prolongé, car la formation est toujours à recommencer.

D'un autre côté, si le liquide n'était pas acidulé, la résistance deviendrait énorme et les effets de la charge et de la décharge seraient déplorables. « Lorsque, dit M. John Sprague[1], la matière consiste en une masse spongieuse contenant du liquide dans ses interstices, l'acide peut être intérieurement chassé dès le début de la décharge et, par conséquent, une grande partie de la matière reste intacte, et le liquide restant, ayant une grande résistance au commencement de la charge, le courant ne peut atteindre la matière. Comme conséquence, un élément contenant une grande quantité de matière active peut ne donner qu'un faible travail; cet inconvénient va en augmentant, une partie de la masse devient non conductrice et isole d'autres parties que l'acide atteint. »

---

1. *Annales de l'Électricité,* numéro du 15 septembre 1883.

En résumé, l'acide sulfurique présente un inconvénient et un avantage. L'inconvénient résulte de ce que sa présence donne naissance à du sulfate de plomb mauvais conducteur et nécessitant, par suite de sa chute, une formation qui est toujours à renouveler. Son avantage consiste dans la bonne conductibilité qu'il fournit au liquide et grâce à laquelle toute la matière active peut agir d'une façon efficace. On pourra discuter l'importance de cet inconvénient et de cet avantage. Quant à moi, j'estime que si l'on se place au point de vue de la capacité d'emmagasinement, il est un vœu à formuler, c'est qu'on puisse bientôt remplacer l'acide sulfurique par une autre substance possédant la même qualité, mais exempte du défaut signalé.

Si nous nous reportons aux chiffres théoriques donnés ci-dessus, on n'est pas peu surpris de constater l'immense écart qui existe entre ces chiffres et ceux que fournit la pratique. Jusqu'ici, en effet, on n'est guère parvenu à produire un travail de un cheval-heure électrique avec un poids inférieur à 60 kilos, alors que, d'après la théorie, un poids de 11 kilos devrait suffire.

D'où provient cette énorme différence ?

Prenons l'accumulateur Planté à dépôt naturel de matière active. Lorsque le courant passe, le liquide est électrolysé et les éléments constitutifs qui se séparent dans la décomposition vont exercer une action chimique à la surface des électrodes. Mais, en même temps, ces atomes, qui sont les uns électro-positifs et les autres

électro-négatifs, transmettent avec eux leur charge d'électricité qui se porte sur la partie conductrice de l'électrode, et c'est ainsi que ces dernières se chargent à un certain potentiel.

Or, comme le dit M. l'ingénieur Bandsept, « les constituants du liquide traversent d'autant plus facilement la surface des électrodes, que celle-ci est plus poreuse *et la condensation de ces éléments est d'autant plus complète que les pores sont plus serrés.* »

La première condition à réaliser, c'est donc de faciliter la pénétration des constituants électrolytiques à travers la couche extérieure des électrodes.

Lorsque les électrodes sont de simples feuilles de plomb, la porosité métallique n'est pas suffisante pour permettre aux constituants d'atteindre une grande profondeur; la formation électrique des électrodes devient donc nécessaire et demande une durée considérable.

Quant à la deuxième condition, elle est réalisée par la formation électrique elle-même de l'électrode.

Dans les accumulateurs à dépôt artificiel, il est à remarquer que les oxydes plombiques sont essentiellement poreux, mais pour obtenir une condensation plus complète, on comprend que ce n'est que par une compression énergique de l'oxyde qu'on peut parvenir à l'atteindre. C'est un des motifs pour lequel nos électrodes sont soumis à une compression de 300 atmosphères. Il y a lieu de remarquer que, même sous cette pression, le liquide parvient encore à pénétrer aisément à travers toute la masse de l'électrode.

Or, les transformations électrolytiques ne peuvent se faire que par tranches excessivement minces; lorsqu'une certaine couche a été transformée en peroxyde, celui-ci oppose une grande résistance aux actions ultérieures. Il y a donc une limite assignée à l'épaisseur des couches actives.

Cette considération avait été perdue de vue dans les accumulateurs Faure, à lames enduites de minium, pour lesquels on disait, à l'origine, que la capacité augmentait proportionnellement à l'épaisseur de la couche active.

Aux deux conditions indiquées ci-dessus s'en ajoute une troisième également importante; nous voulons parler de la distribution de la force électrique dans la masse spongieuse. M. Bandsept[1] explique très bien cette considération de la manière suivante :

« Le courant de décomposition étant reçu à la partie métallique de l'électrode, il se porte à la surface de celle-ci par un effet de conductibilité. Mais le passage de l'électricité dans les substances adjointes aux lames est accompagné d'une perte de force marquante, puisque l'électricité doit modifier la structure des matières divisées qu'elle rencontre, pour se frayer un passage. Le champ de réduction chimique se renferme forcément dans des limites assez étroites, du moment que les actions doivent conserver une énergie suffisante pour opérer la décomposition des tranches situées vers l'extérieur.

« On voit donc que l'épaisseur des couches participant effectivement aux réactions électro-chimiques se trouve limitée par

1. *Moniteur industriel,* numéro du 28 février 1884.

les conditions de distribution des lignes de force et par celles qui se rapportent à la pénétration des masses actives. »

C'est afin de tenir compte de la distribution des lignes de force que, dans nos agglomérés, nous introduisons de la limaille de plomb très divisée dans l'intérieur de l'aggloméré. Chaque morceau de limaille est en quelque sorte recouvert d'une couche d'oxyde dont l'épaisseur n'est pas assez grande pour empêcher la conductibilité d'un morceau à son voisin. Cette limaille agit donc comme conducteur dans toute la masse d'oxyde plombique qui, par ce moyen, peut travailler d'une façon beaucoup plus efficace.

Il ne sera pas sans intérêt, croyons-nous, de rappeler les progrès que l'on a réalisés dans ces dernières années, au point de vue de la capacité d'emmagasinement des accumulateurs à base de plomb.

Les accumulateurs Planté, modèle en spirale, que nous avons décrits antérieurement, exigent 180 kilos par cheval-heure électrique, après un millier d'heures de travail. Ce chiffre peut, toutefois, être réduit par un long usage de l'appareil. Ainsi, dans des expériences qui ont été entreprises sur des couples Planté par MM. Hospitalier et Franck Géraldy, un kilogramme de plomb, c'est-à-dire d'électrode, avait fourni, pendant une décharge continue, sans utilisation des résidus, 2 700 kilogrammètres, ce qui revient à dire que 100 kil. d'électrodes de ce système étaient capables de produire un cheval-heure électrique.

Dans des couples exceptionnellement bien formés, M. Planté est parvenu à obtenir 3 230 kilogrammètres par kilogramme de plomb, ce qui correspond à 83 kilos par cheval-heure.

Nous avons, en ce moment, une batterie d'éléments à fils parallèles pesant chacun 32 kilos. Cette batterie travaille depuis près de 3 ans. La capacité d'emmagasinement est d'environ 18 000 coulombs sous un potentiel de 1v.,9, soit 3 420 kilogrammètres par kilogramme, ou 78 kilos par cheval-heure.

M. Fontaine a publié dans la *Revue industrielle* du 5 septembre 1883, un tableau indiquant la capacité des accumulateurs de Kabath après un certain nombre d'heures d'expériences.

Après	75 h.	de formation,	1 k.	de plomb	rend	750	kilogrammèt^s.
»	150	»	»	1 k.	»	» 1 000	»
»	500	»	»	1 k.	»	» 2 000	»

« A partir de ce moment, dit M. Fontaine, la capacité augmente à raison de 25 kilogrammètres par kilo de plomb, pour 10 heures de charge à 10 ampères. Les charges ayant lieu chaque fois à saturation. »

Partant de cette loi, M. Fontaine établit, par le calcul, qu'après :

1 000 h.	de formation,	83 k.	de plomb	rendent un	cheval-heure.
2 000 h.	»	47 k.	»	»	»
3 000 h.	»	32 k., 8	»	»	»
4 000 h.	»	25 k.	»	»	»

Cette loi est exclusivement théorique et ne représente

nullement ce qui se passe en pratique. Si M. Fontaine veut procéder à de longues expériences, il reconnaîtra bien vite qu'à partir de 1 000 heures de formation, et même avant 1 000 heures, son chiffre de 25 kilogrammètres doit se réduire notablement et que cette réduction devient plus sensible encore si l'on atteint 2 000, 3 000 et 4 000 heures.

Dans les expériences qui furent faites au Conservatoire des arts et métiers sur des accumulateurs Faure, à plaques enduites de minium, MM. Tresca, Allard, Leblanc, Joubert et Potier ont trouvé qu'un kilogramme de pile Faure rendait 2 500 kilogrammètres. Mais il y a lieu de remarquer que par kilogramme de pile, les expérimentateurs comprenaient, dans ce poids, celui du récipient et celui du liquide. Nous croyons qu'on peut majorer le chiffre 2 500 d'un tiers, ce qui ferait

$$2\,500 + \frac{2\,500}{3} = 3\,333 \text{ kilogrammètres,}$$

soit 81 kilogrammes d'électrode par cheval-heure.

MM. Monnier et Guitton ont trouvé, dans le courant de septembre 1883, que 70 kilos d'électrode d'accumulateurs Faure pouvaient débiter un cheval-heure électrique.

Dans des expériences récentes sur nos éléments à plaques agglomérées, nous avons obtenu, par une décharge continue sur des lampes à incandescence, 35 000 coulombs par kilogramme d'électrodes, ce qui, sous un potentiel de $2^{v},15$, donne, en se servant de la formule

$$W = \frac{EQ}{g} = \frac{2,15 \times 3\,500}{9,8} = 7\,673 \text{ kilogrammètres,}$$

soit 35 kilos par cheval-heure.

Par un nouveau perfectionnement que je viens d'imaginer dans le but d'obtenir une meilleure répartition de la distribution électrique dans la masse spongieuse, j'espère arriver à réduire encore ce chiffre.

En résumé, l'on voit que les progrès obtenus au point de vue de la capacité d'emmagasinement sont réels, et que les accumulateurs à base de plomb peuvent, tels qu'ils sont actuellement, rendre de véritables services dans un grand nombre d'applications industrielles.

Accumulateurs au cuivre. Soit un accumulateur dont l'électrode positive est un aggloméré à oxyde de plomb, l'électrode négative une plaque de cuivre, et le bain une solution de sulfate de cuivre légèrement acidulée.

Pendant la décharge, admettons que les réactions soient exprimées par la formule :

$$CuCu + SO^4H^2 + PbO^2 = Cu + CuSO^4 + H^2O + PbO.$$

Cette équation intéresse donc un équivalent de PbO^2 et un équivalent de cuivre.

La force électro-motrice E de ce système d'accumulateurs est $1^{v},26$, et l'équivalent m du cuivre, 31,5.

On a donc pour l'électrode positive :

$$P = \frac{9,81}{1,26} \times 75 \times \frac{119,5}{26\,402} = 2^{k},627,$$

et pour l'électrode négative :

$$P = \frac{9,81}{1,26} \times 75 \times \frac{31,5}{26\,402} = 0^{k},695.$$

On devra, comme ci-dessus, quadrupler le poids obtenu pour PbO^2, et, quant au cuivre, il y a lieu de faire les remarques suivantes :

Il résulte de nos expériences que, lorsque l'électrode négative est une plaque en cuivre, cette plaque se troue par le repos, ou par l'usage, en un grand nombre d'endroits. Il se produit une véritable dissolution du métal dans le liquide. A moins donc de donner à cette électrode une épaisseur relativement forte, nous ne croyons pas qu'un tel accumulateur puisse être employé dans l'industrie. Toutefois, ce qu'il est possible de faire, c'est de remplacer cet électrode (support) par un autre élément dont le seul rôle soit de conduire l'électricité. Cet élément ne pourra pas se laisser attaquer par le liquide. M. Reynier s'est servi, sans doute dans ce but, d'un support en plomb. Nous avons, de notre côté, employé le charbon, parce que nous avons constaté que $Pb - Cu$ était capable de donner naissance à un couple qui amenait l'attaque de Pb.

Ainsi donc, si l'on emploie une plaque en charbon pour l'électrode négative, il est clair que son poids sera au moins le quadruple du poids que nous avons obtenu pour l'équivalent de Cu intéressé dans la réaction.

Il s'ensuit que les accumulateurs au cuivre pourront donner un cheval-heure par

$$4\,(2{,}627 + 0{,}695) = 13^{k},288 \text{ d'électrodes.}$$

Accumulateurs au zinc. Cet accumulateur diffère du précédent en ce sens que le sulfate de cuivre est

remplacé par du sulfate de zinc. Il y a, surtout ici, avantage à remplacer la plaque en zinc (électrode négative) par du charbon, à cause de la facilité avec laquelle le métal se dissout dans le bain.

Pour cet accumulateur on a $E = 2^{v},35$ et m pour le zinc, 32,7.

Quant au poids de l'électrode positive, il sera donné par

$$P = \frac{9,81}{2,35} \times 75 \times \frac{119,5}{26\,402} = 1^{k},417.$$

et celui de l'électrode négative par

$$P = \frac{9,81}{2,35} \times 75 \times \frac{32,5}{26\,402} = 0^{k},385.$$

En quadruplant ces poids, nous aurons :

$4\,(1^{k},802) = 7^{k},208$ d'électrode par ch.-h. électrique.

Conclusion. L'accumulateur au zinc est celui qui, pour un poids déterminé, permet d'obtenir théoriquement la plus grande capacité d'emmagasinement. Cette conclusion théorique n'est malheureusement pas ratifiée par la pratique, à cause des actions locales qui se produisent quand l'accumulateur est chargé. Les recherches des électriciens doivent donc tendre à la suppression de cette attaque locale.

§ 8.

DURÉE.

La durée des accumulateurs dépend exclusivement de la manière dont on les fait travailler.

Si, voulant augmenter la puissance d'emmagasinement des couples, on les surcharge d'une façon permanente, il est clair que la peroxydation tendra à pénétrer de plus en plus, à chaque nouvelle charge, et que les plaques positives ne pourront résister longtemps à un tel service.

Je n'ai jamais entendu dire que des couples Planté dont les électrodes avaient une épaisseur de 1 millimètre ont dû être mis hors d'usage, parce que les électrodes positives étaient complètement transformées en peroxyde. Nous avons des batteries d'éléments à fils parallèles qui fonctionnent depuis plus de 3 ans, et jamais une plaque positive n'a dû être remplacée. Pourquoi, d'un autre côté, les éléments de Meritens et de Kabath ne résistent-ils pas à un très long usage ?

Le motif en est bien simple. Si l'on veut agir sagement en donnant à la partie conductrice des électrodes une épaisseur relativement forte, 1 $^{m}/_{m}$ environ, il faudra un très long espace de temps avant que toute cette épaisseur n'ait subi la peroxydation. Or, c'est ce qui n'a pas lieu dans les couples de Meritens et de Kabath, dans lesquelles le support conducteur est d'une épaisseur excessivement réduite.

Il est vrai que la question qui a surtout préoccupé le monde électrique, dans ces dernières années, se rapportait bien plus à la puissance d'emmagasinement qu'à la durée même des accumulateurs. On a négligé ce dernier facteur qui a une importance aussi grande que la capacité. En voulant réaliser des prodiges, au point de vue de la capacité, on a fait fausse route, selon nous, car l'industrie réclame bien plus des choses utiles que des choses étonnantes.

N'est-il pas évident qu'il est préférable de sacrifier, dès l'abord, quelques kilogrammes d'électrodes par cheval-heure, dans le but d'obtenir une longue durée, plutôt que de fournir des appareils, sans doute plus puissants, mais dont l'existence sera extrêmement réduite?

Lorsqu'on possède une batterie d'accumulateurs capable de rendre 25 000 ou 30 000 coulombs par kilogr., pourquoi ne pas se contenter d'une telle capacité? Si l'on ne surcharge pas les éléments, ceux-ci *pourront durer un très grand nombre d'années.*

C'est surtout dans les accumulateurs à dépôt artificiel que l'on s'est peu préoccupé de la durée. Aussi l'on commence depuis quelque temps à regretter ce qui a été fait. C'est à l'expérience à décider de la durée des piles secondaires qui auront été confectionnées dans les conditions que réclame l'industrie.

Il y a deux choses que l'on doit recommander : l'une à celui qui doit se servir de piles secondaires et l'autre au constructeur.

Au premier nous dirons : Gare à la surcharge! et au

second nous conseillerons d'imaginer un procédé qui permette de remplacer les plaques mises hors d'usage à très peu de frais.

Pour ce qui concerne ce dernier point, il sera bon de disposer les plaques dans les récipients de manière qu'on puisse enlever les positives avec une très grande rapidité. Ensuite, qu'on veuille bien remarquer que les réactions chimiques ne diminuent pas le poids des électrodes. Si l'on tient compte de cette observation, qu'une plaque positive mise hors d'usage est composée presque entièrement de matière active, on voit qu'il suffira de fabriquer une pâte nouvelle avec ce peroxyde qui aura été broyé pour l'introduire dans une nouvelle carcasse d'électrode. Ce qui précède est tellement vrai que, après en avoir fait l'expérience, nous avons trouvé que des éléments montés de la sorte donnaient, après une première charge, une capacité d'emmagasinement considérable, et certainement suffisante pour être immédiatement employée dans les applications.

On peut donc éviter les frais d'une nouvelle formation et la réfection des éléments est ainsi peu coûteuse.

Comme on le voit, la ruine des positifs n'est pas une ruine proprement dite, et ce défaut n'est pas aussi grand qu'on le croyait à l'origine.

Nous n'avons parlé, dans ce qui précède, que des plaques positives, parce que l'expérience prouve que les électrodes négatives peuvent servir indéfiniment. Si l'on soigne, enfin, la confection du récipient (nous avons tout lieu, pour notre part, d'être satisfait de ceux dont

nous nous servons), on reconnaît que l'amortissement de la batterie ne devra porter que sur les électrodes positives.

§ 9.

POIDS.

Que doit-on entendre par le *poids des accumulateurs électriques?* La définition du *poids des accumulateurs* est extrêmement importante pour les personnes qui veulent acheter ces appareils. Suivant la définition donnée à ce terme, on constatera des différences énormes dans la puissance d'emmagasinement des divers systèmes que l'on voudra mettre en expérience.

En réalité, une pile secondaire, ou accumulateur, se compose de deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, plongeant dans un bain que contient un récipient. Dans certains appareils, l'on se sert d'éléments isolants pour séparer les électrodes, ou pour maintenir les matières actives contre le support. Enfin, des serre-fils placés en dehors du liquide permettent de réunir les pôles aux conducteurs du circuit extérieur.

Voilà, en résumé, les divers éléments entrant dans la composition d'un accumulateur.

Faut-il que tous ces éléments soient considérés comme faisant partie du *poids d'un accumulateur?*

En me plaçant au point de vue industriel, je n'hésite pas à répondre négativement, et j'ajouterai même que la seule manière de voir qui me paraisse honnête consiste à envisager *uniquement le poids des électrodes*

comme étant le poids réel d'un accumulateur. Les considérations suivantes justifient ma définition.

Que l'on adopte, par exemple, un grand écartement entre les électrodes; comme l'intervalle qui les sépare est rempli de liquide, il s'ensuivra qu'un tel appareil sera plus lourd que si les lames sont fort rapprochées. Étant admis que, pour éviter les contacts entre les plaques, il est nécessaire de les écarter l'une de l'autre d'environ 3 millimètres, comme une couche de liquide n'ayant que cette épaisseur de 3 millimètres est presque toujours suffisante pour les réactions chimiques, n'est-il pas évident que le surplus sera un poids mort qui ne contribuera absolument pas à la puissance d'emmagasinement de l'accumulateur ?

En second lieu, la nature du récipient peut jouer un très grand rôle; ainsi, une caisse en bois doublée de plomb aura un poids notablement supérieur à celui d'une même caisse en bois dont l'enveloppe intérieure serait en caoutchouc durci. Et cependant le degré d'énergie de l'appareil sera le même dans les deux cas.

D'ailleurs, les données que l'on a obtenues dans ces derniers temps au sujet de la capacité des accumulateurs, sont toujours rapportées *à la capacité par kilogramme d'électrode.*

Lorsqu'on dit qu'un accumulateur Planté a une capacité de 20 000 coulombs par kilogramme, cela signifie que chaque kilogramme *de plomb* entrant dans les électrodes peut emmagasiner 20 000 coulombs.

S'il s'agit des accumulateurs à dépôt artificiel, le

kilogramme se rapporte au poids de la matière active, plus le poids du support contre lequel est appliquée cette matière active.

En résumé, c'est toujours le kilogramme d'électrode qu'il faut considérer quand on parle de la puissance d'emmagasinement des accumulateurs.

Un exemple va nous faire voir les mécomptes auxquels on s'expose lorsqu'on fait entrer dans le poids d'un accumulateur, le poids du récipient, du liquide et des accessoires.

Supposons qu'un industriel veuille éclairer une lampe de 50 volts et exigeant 1 ampère pendant 10 heures; demandons-nous quel est le poids d'électrode nécessaire pour satisfaire au désir de cet industriel.

Prenons des accumulateurs ayant une force électromotrice moyenne de 2 volts, et formés suffisamment pour débiter d'une façon continue, par kilogramme d'électrode, 18 000 coulombs.

Il faudra 25 éléments en tension pour éclairer la lampe de 50 volts.

Cette lampe de 1 ampère consomme $1 \times 3\,600^{c.} =$ 3 600 coulombs par h.; et pour un éclairage de dix h., la consommation sera de $10 \times 3\,600^{c.} = 36\,000$ coul^{s}.

Comme 1 kilogramme d'électrode a une capacité de 18 000 coulombs, il faudra, pour obtenir l'éclairage, pendant dix heures, des éléments de $\frac{36\,000}{18\,000} = 2$ kilos.

Nous avons vu qu'il fallait 25 éléments semblables; par conséquent, le poids total d'électrode sera :

$$25 \times 2 = 50 \text{ kilos.}$$

C'est ici qu'il faut bien se rendre compte de la question du poids.

En effet, vous commandez, par exemple, à une société qui fabrique des accumulateurs, 25 éléments de 2 kilos. Or, que va vous envoyer cette société? Si elle est habituée (c'est ce qui se fait presque partout et à tort, selon moi,) à faire entrer dans le poids des accumulateurs, et celui du liquide et celui du récipient, et, enfin, le poids des divers accessoires, n'est-il pas évident que les électrodes des 25 éléments, au lieu d'avoir un poids de 2 kilos, pèseront *à peine la moitié*, et comme les calculs sur la puissance d'emmagasinement ont été faits en prenant pour base le kilogramme d'électrode, ne s'ensuivra-t-il pas que l'éclairage, au lieu de durer dix heures, pourra seulement se maintenir pendant cinq heures?

Ce simple calcul suffit pour montrer combien les industriels doivent se mettre en garde quand il s'agit de l'achat des accumulateurs. Il est incontestable que jusqu'ici l'on a abusé d'une façon scandaleuse de la définition du *poids des accumulateurs*. Aussi j'estime que toute société honnête devrait définir dans ses prospectus, d'une façon nette et claire, le poids exact des électrodes entrant dans la composition des divers types d'accumulateurs qu'elle met en vente, ou bien le nombre de coulombs que chaque type est capable de débiter.

§ 10.

CONSIDÉRATIONS SUR LES DÉTAILS ET ACCESSOIRES DES ACCUMULATEURS.

Dans l'examen qui précède, nous avons surtout considéré les réactions chimiques qui prennent naissance lorsque des électrodes chargées plongent dans un certain liquide. Mais pour qu'un accumulateur puisse rendre de réels services dans l'industrie, il faut que les agencements physiques des accessoires soient combinés de manière à pouvoir répondre à toutes les éventualités.

Nous allons examiner, dans ce qui va suivre, les particularités qui sont relatives : 1° à la nature du récipient, 2° aux couvercles, et 3° aux accessoires des électrodes qui se trouvent hors du liquide.

1° RÉCIPIENT.

La question du récipient a très souvent contrarié les constructeurs d'accumulateurs électriques.

Si les éléments ont un poids inférieur à 5 kilos, la substance la plus convenable à employer est le verre; toutefois, celui-ci donne lieu parfois à de grands mécomptes.

Ainsi, lorsque les accumulateurs renfermés dans des récipients en verre se trouvent placés dans des endroits où les variations de température sont assez brusques,

il arrive fréquemment que le vase se brise, même sans être remué. Le liquide se répand naturellement tout autour du vase, et comme il est toujours acidulé, il détériore la substance sur laquelle le récipient repose.

S'il est posé sur une table en bois ou sur un plancher, il est évident que la détérioration est sensible. Nous avons une fois constaté que, dans l'intervalle d'une seule nuit, six vases en verre s'étaient brisés.

Le moyen de rendre la casse beaucoup moins grande, c'est de *tremper* le verre.

Lorsqu'il s'agit d'accumulateurs d'un poids supérieur à 5 kilos, on ne peut plus guère songer à se servir de récipients en verre. Le maniement en devient trop difficile; le vase est trop fragile : il se brise au moindre choc.

Certains électriciens ont employé des récipients en grès. Ces récipients sont lourds, et on a observé qu'après quelques mois de fonctionnement de l'accumulateur, le grès était troué en différents endroits. Nous présumons que, dans la composition de la terre servant à la construction du vase, il existe certains sels métalliques qui subissent l'action du courant électrique, et c'est cette dernière action qui, en attaquant ces sels, amène une véritable dissolution : de là la production des trous.

On a beaucoup essayé des caisses en bois enduites d'un mastic isolant dont on faisait breveter la composition. Nous avons essayé un grand nombre de ces caisses avec toute espèce de mastic, et nous devons ajouter que

si, dans une batterie, certaines d'entre elles se comportaient convenablement, il y en avait toujours plusieurs qui laissaient échapper le liquide.

M. Reynier emploie depuis quelque temps un récipient formé par deux caisses en bois, l'une enveloppant l'autre, avec un jeu de plusieurs millimètres. Cet intervalle est garni d'un mastic étanche, souple et isolant, à base de bitume. « J'ai eu d'abord quelque peine, dit M. Reynier, à réussir le garnissage interne de ces récipients, mais aujourd'hui on l'obtient sans difficulté, grâce à un outillage spécial et à certains tours de mains que la pratique a révélés. »

Des récipients qui ont souvent donné de bons résultats étaient construits en ébonite ou en caoutchouc durci; mais ces substances coûtent cher, et subissent un certain retrait par l'usage. De plus, cette matière est fort cassante.

Comme on le voit, il n'est guère aisé de réaliser un système de récipient parfait.

Un récipient doit, en effet, satisfaire à de nombreuses conditions : il faut qu'il soit inattaquable par le liquide; que, pendant le fonctionnement de l'accumulateur, le courant électrique n'exerce aucune action nuisible sur les éléments constitutifs du récipient; qu'il soit peu coûteux; que le maniement puisse se faire aisément, et qu'il résiste aux chocs de toute nature auxquels il est exposé dans certaines applications.

Après avoir expérimenté les divers systèmes que nous avons mentionnés, il nous a paru que le meilleur

récipient était constitué par une caisse en bois enveloppant intérieurement une caisse très mince en plomb. La construction de celle-ci a donné lieu à de grandes difficultés ; mais actuellement nous sommes arrivés à un très grand degré de perfection.

Dans les premiers essais que nous avons tentés dans cette voie, nous utilisions le système à pliage rayonnant que M. Reynier employait pour la construction de ses vases poreux en papier parcheminé. Voici comment on procédait :

On commence par préparer un mandrin en bois affectant extérieurement les dimensions intérieures du récipient à construire. On pose alors debout, sur une feuille

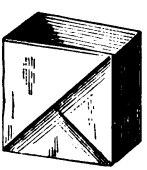

Fig. 26.

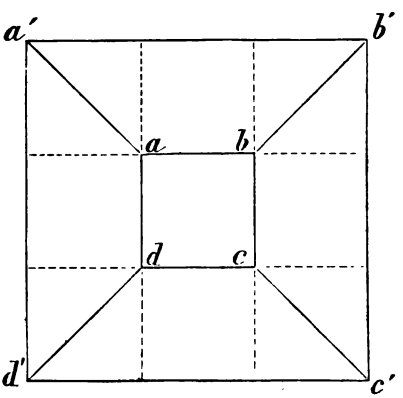

Fig. 27.

de plomb, le mandrin, de manière que la base soit appliquée en *abcd*. On relève ensuite les parties de la feuille de plomb suivant les faces du mandrin *ab*, *bc*, *cd*, *da* ; on plie alors le plomb suivant les diagonales *aa'*, *bb'*, *cc'*, *dd'*, et on applique les plis diagonaux sur deux faces opposées *ad* et *bc* (fig. 26 et 27).

Lorsqu'un accumulateur renfermé dans un tel récipient est au repos, il semble se trouver dans un état parfait : on ne constate pas la moindre fuite. Mais si l'on charge l'accumulateur, on n'est pas peu surpris de constater que l'appareil *coule,* suivant l'expression vulgaire.

Voici ce qui se passe :

Pendant l'action de l'électrolyse, on constate, surtout lorsque le courant de charge est un peu intense, que des gouttelettes très minces partent en tous sens de la surface liquide, pour s'élever à une hauteur qui peut atteindre $0^{m.}$,25. Je ne puis mieux comparer cet effet qu'à la *pluie montante* que l'on observe dans un verre que l'on remplit d'eau gazeuse, surtout au moment où l'on appuie sur le bouchon du syphon pour laisser écouler le liquide dans le verre. Or, ces gouttelettes liquides montent dans les plis de la feuille de plomb, et le phénomène de la capillarité aidant, le liquide atteint bientôt la partie supérieure du récipient; il s'écoule ensuite entre le récipient en plomb et la caisse en bois, et, par les joints de cette dernière, se déverse bien vite sur le plancher.

C'est ce qui nous a obligés d'imaginer un nouveau système, constitué de la manière suivante :

Prenons une feuille de plomb que nous plierons en *ab, bc, cd, ef,* (figure 28), de manière à réaliser une caisse sans fond. Les extrémités de cette feuille, *mn, gh,* se recouvrant sur $0^{m.}$,01 environ de largeur, sont réunies au moyen d'une soudure autogène, ensuite on

soude un fond, également en plomb, suivant les arêtes inférieures de la caisse.

Cette opération est plus facile à expliquer qu'à réaliser en pratique, car le récipient en plomb, n'ayant

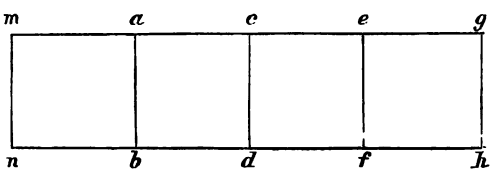

Fig. 28.

d'autre but que d'empêcher les fuites, ne peut avoir qu'une épaisseur extrêmement réduite : un demi-millimètre est suffisant. Or, les soudures doivent être *autogènes,* plomb soudé avec plomb; les gens du métier connaissent seuls les difficultés de soudures semblables.

Ce n'est d'ailleurs qu'en se servant d'un outillage tout à fait spécial qu'on parvient à triompher de ces difficultés.

Si l'on se servait de soudures à l'étain, on constaterait, immédiatement après avoir versé l'acide, que des fuites se feraient jour.

Depuis près de deux ans, nous nous servons de ce système qui nous a donné jusqu'ici des résultats tout à fait satisfaisants; c'est le seul que nous croyons devoir recommander dans les applications industrielles.

Certains électriciens ont cru utile de se servir du récipient intérieur en plomb comme électrode. Ce dispositif peut être avantageux, lorsque le récipient fait

fonction d'électrode négative (électrode réduite pendant la charge). Il faut alors avoir bien soin d'isoler ce récipient, d'une façon parfaite, de tout ce qui l'entoure; sinon il se produirait des dérivations conductrices de l'électricité qui amèneraient des déperditions de l'énergie emmagasinée. De plus, il faut éviter que les électrodes et les queues de celles-ci ne touchent le récipient, car, dans ce cas, il se formerait un court circuit qui rendrait impossible la charge de l'accumulateur.

Pour éviter ces accidents qui peuvent si facilement se présenter par suite du maniement des appareils, nous ne croyons pas trop devoir recommander ce dispositif. Il est préférable, nous semble-t-il, de perdre, dans la plupart des applications, deux ou trois kilogrammes de plomb laminé pour le récipient, que de s'exposer aux inconvénients que nous venons de signaler.

2° COUVERCLE.

Nous avons vu ci-dessus que, sous l'action de l'électrolyse, des gouttelettes liquides pouvaient s'élever en tous sens jusqu'à une hauteur qui peut même atteindre $0^{m.},25$. Si le vase n'a pas de couvercle, ces bulles liquides vont retomber, en partie dans le liquide, et en partie aussi tout autour du récipient. Dans un certain rayon, tout est mouillé, absolument comme s'il y avait une fissure au récipient. Dans ces conditions, l'on conçoit que le liquide disparaît rapidement. Nous dirons donc, d'une façon générale, que le récipient qui contient les

éléments de la pile secondaire doit être recouvert par un couvercle solide, percé d'une ouverture pour permettre aux gaz qui se produisent pendant le travail de l'appareil, de s'échapper. Le passage pour les gaz devant être très minime, il est utile de boucher partiellement cette ouverture par un bouchon qui ne ferme pas d'une façon hermétique et qui laisse, au contraire, sur son pourtour certains vides très petits. On enlèvera le bouchon pour remplir de liquide le récipient.

Par cette disposition, les bulles liquides rencontrent la partie inférieure du couvercle et peuvent retomber en gouttes plus grosses à l'intérieur du récipient.

Pour réaliser cette dernière condition, il y a lieu de remarquer que le choix de la matière du récipient n'est pas indifférent. Ainsi, il est clair que si l'on adoptait un simple couvercle en bois, celui-ci, étant perméable, boirait en quelque sorte toutes les gouttelettes produites qui ne pourraient évidemment plus retomber dans le récipient. De plus, ces gouttelettes étant presque toujours acidulées, finiraient par attaquer le bois lui-même. S'il s'agit d'un accumulateur à dissolution saline, sulfate de cuivre ou sulfate de zinc, par exemple, l'on observe que le bois est bien vite imprégné de cristaux qui remplissent ses pores et établissent, à la longue, un circuit conducteur entre les deux électrodes.

Il nous paraît avantageux, lorsqu'on se sert de couvercles en bois, de revêtir la partie inférieure du couvercle d'un mastic imperméable empêchant le liquide d'arriver jusqu'au bois. M. Hospitalier, dans son

Formulaire de l'Électricien, donne la composition de plusieurs mastics qui peuvent être utilement employés.

On obtient également de bons résultats, en soumettant les couvercles à une opération analogue à celle du créosotage des billes de chemin de fer; seulement, au lieu de créosote, on se sert ici de parafine.

Enfin, si l'on ne veut pas recourir à l'un de ces procédés, on pourra se contenter de placer sous le couvercle une feuille de caoutchouc mou.

Il est évident qu'au lieu du bois, on se servira avec avantage d'un couvercle en caoutchouc durci ou en ébonite; malheureusement ces substances, qui ne sont pas du tout conductrices de l'électricité, coûtent fort cher.

Comme les queues des électrodes traversent souvent le couvercle, il faut avoir grand soin de les enduire, à leur passage à travers le couvercle, d'un mastic isolant qui les empêche, autant que possible, de se trouver directement en contact avec lui, surtout s'il est en bois.

Est-il nécessaire d'ajouter que la présence d'un couvercle, placé en tenant compte des observations qui précèdent, aura encore l'avantage de réduire au minimum l'évaporation naturelle du liquide? Celui-ci, en s'évaporant, devra nécessairement s'accumuler sous le couvercle en gouttelettes qui, lorsqu'elles auront acquis un volume suffisant, retomberont à l'intérieur du récipient.

3° ACCESSOIRES DES ÉLECTRODES.

Il faut toujours éviter que l'action du liquide n'exerce une fâcheuse influence sur tous les accessoires qui se trouvent en dehors du liquide.

C'est surtout avec les accumulateurs à dissolution saline que nous avons constaté combien cette action pouvait être nuisible. Nous nous rappelons que, dans certains accumulateurs P*b* — C*u*, nous avions fait souder, à $0^{m.}$,05 au moins en dehors du liquide, à la queue de l'électrode, un gros fil de cuivre de $0^{m.}$,003 de diamètre. Il nous est arrivé très fréquemment d'observer la disparition de la soudure, et la queue en plomb était bien séparée de plus de $0^{m.}$,005 du fil de cuivre. Pour expliquer cette action, il suffit de songer que le liquide montant jusqu'à la soudure, produit un véritable couple voltaïque qui amène l'attaque de l'un des éléments et, par conséquent, la séparation en question.

Afin d'éviter cette action nuisible, il faut avoir soin d'enduire, d'un mastic isolant, la queue de l'électrode, depuis la surface liquide, et même à $0^{m.}$,01 en dessous de cette surface, jusque près de l'extrémité qui doit être parfaitement dénudée pour pouvoir recevoir le serre-fil ou le raccord.

Nous estimons qu'il est toujours très utile de prolonger la queue sur une longueur de près de 0^{m},10 au dessus du couvercle.

Lorsqu'on fait usage de serre-fils, ou de bornes, pour réunir les accumulateurs, soit en tension, soit en

quantité, il faut toujours conserver ces accessoires dans un parfait état de propreté.

A ce point de vue, le couvercle est très utile, car il empêche les vapeurs acides de ternir ces accessoires en les oxydant.

Enfin, les vis des serre-fils et des bornes doivent toujours être serrées très fortement.

On s'aperçoit facilement que le serrage n'est pas suffisant, car, dans ce cas, la vis s'échauffe à un degré relativement élevé pendant la charge de l'accumulateur.

Les considérations que nous venons de développer nous montrent clairement que, pour créer un bon accumulateur industriel, il ne suffit pas de réaliser une combinaison d'électrodes dont les réactions chimiques donnent de puissants effets électriques. Il faut qu'une étude simultanée des dispositifs des accessoires rende l'appareil apte à donner des résultats utiles dans la majeure partie des applications industrielles.

Une invention, quelle qu'elle soit, ne peut rendre de réels services que lorsque tous les agencements des diverses parties constitutives permettent une utilisation sérieuse.

Un exemple fera saisir aisément ce qui précède. Les accumulateurs dont l'une des électrodes est en charbon ne pourront, à notre avis, rendre de véritables services que lorsqu'on aura trouvé le moyen de lui adapter un raccord convenable. Le raccord subit toujours avec cette électrode une oxydation qui l'encrasse et produit

ainsi un mauvais contact. Les accumulateurs de ce genre ne sont cependant pas mauvais; bien au contraire, mais l'appropriation du dispositif hors du liquide en rend l'emploi fort difficile.

Disons donc, d'une façon générale, que, s'il y a lieu de se préoccuper des actions chimiques qui se produisent dans un accumulateur, il faut également prendre grand soin des agencements physiques des accessoires qui peuvent, à un moment donné, jouer un rôle considérable.

TABLEAU RÉSUMANT L'EMPLOI ET LE MÉRITE DES ACCUMULATEURS.

	ACCUMULATEUR AU PLOMB.		ACCUMULATEUR AU CUIVRE.	ACCUMULATEUR AU ZINC.
	A DÉPOT NATUREL.	A DÉPOT ARTIFICIEL (ÉLÉMENTS AGGLOMÉRÉS).		
Polarisation.	Très sensible.	Sensible.	Très peu sensible.	Très peu sensible.
Force électro-motrice. . .	1v.,9 après 1 000 heures de formation.	2v.,15 après une heure de formation.	1v.,26.	2v.,36.
Résistance.	0ohm,005 minimum.	0ohm,005 minimum.	0ohm,04 minimum.	0ohm,04 minimum.
Équation chimique de la décharge	Action principale : $Pb + H^2O + PbO^2 = PbO + H^2O + PbO$. Action secondaire : $PbO + H^2SO^4 = PbSO^4 + H^2O$.	Action principale : $Pb + H^2O + PbO^2 = PbO + H^2O + PbO$. Action secondaire : $PbO + H^2SO^4 = PbSO^4 + H^2O$.	$CuCu + SO^4H^2 + PbO^2 = Cu + CuSO^4 + H^2O + PbO$.	$ZnZn + SO^4H^2 + PbO^2 = Zn + ZnSO^4 + H^2O + PbO$.
Formation.	Très lente.	Très rapide.	Très rapide.	Très rapide.
Charge	De 0amp.,25 à un ampère par kilogr. d'électrode.	De 0amp.,25 à un ampère par kilogr. d'électrode.	De 0amp.,25 à un ampère par kilogr. d'électrode.	De 0amp.,25 à 1 ampère par kilogramme d'électrode.
Conservation de la charge.	Pendant des mois.	Pendant des mois.	Au bout de quinze jours, la déperdition est fort sensible.	Au bout de quelques jours, presque tout le travail emmagasiné a disparu.
Décharge	1 ampère maximum par kil.	1 ampère maximum par kil.	2 ampères maximum par kil.	3 ampères maximum par kil.
Rendement	78,9 pour cent.	78,9 pour cent.	72 pour cent.	Les actions locales empêchent un chiffre pratique.
Poids d'électrode nécessaire par cheval-heure.	11k.,5.	11k.,5.	13k.,3.	7k,2.

TROISIÈME PARTIE.

APPLICATIONS DIVERSES
DES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

§ 1.

APPLICATIONS PRÉCONISÉES PAR M. PLANTÉ [1].

L'ouvrage que M. Planté publia, en 1879, renseigne un certain nombre d'applications de l'accumulateur électrique. Nous croyons bien faire en en donnant un résumé succinct. On pourra, de cette manière, se rendre un compte plus ou moins exact du chemin parcouru par les couples secondaires depuis cette époque.

Application a la galvanocaustie et a l'éclairage des cavités obscures. Déjà, en 1868, M. Planté avait préconisé l'emploi des couples secondaires pour des opérations qui exigeaient des effets calorifiques puissants et de faible durée. Il suffisait simplement de pro-

1. Dans ses *Recherches sur l'Électricité,* ouvrage publié en 1879.

fiter de la propriété que possèdent les fils métalliques résistants de s'échauffer fortement lorsqu'ils sont traversés par le courant énergique des accumulateurs. En 1873, M. le docteur Onimus effectua des cautérisations de la glande lacrymale sur 7 ou 8 sujets successivement, sans qu'il fût nécessaire de recharger l'appareil.

M. Trouvé a ajouté au couple secondaire de Planté un rhéostat dont le but est de graduer l'intensité du courant qui passe dans un fil de platine; celui-ci s'échauffe au rouge ou au blanc et l'appareil

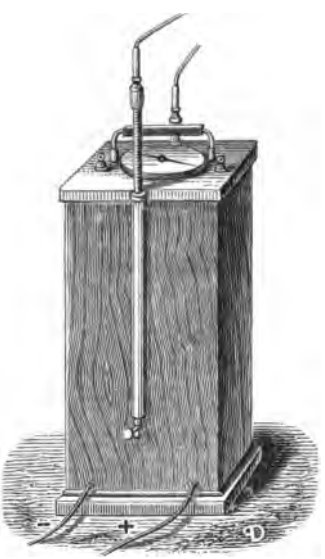

Fig. 29.

Fig. 30.

peut être employé soit comme éclairant, soit comme cautère, dans la galvanocaustie. En y annexant un galvanomètre à deux circuits, on peut suivre la marche de la charge et de la décharge.

Pour l'éclairage des cavités obscures, M. Trouvé se sert de réflecteurs sphériques, concaves ou paraboliques. La fig. 29 représente une boîte qui renferme le couple secondaire destiné à ces opérations. L'aiguille du galvanomètre est indiquée sur le couvercle; la fig. 30 nous donne un échantillon du réflecteur Trouvé.

Application a l'inflammation des mines. L'inflammation des mines n'exige qu'un effet calorifique de très courte durée; aussi les piles secondaires se prêtent-elles admirablement à cette application. Une batterie de 20 couples peut enflammer une amorce formée par un fil de platine de un vingtième de millimètre, plongé dans de la poudre ou du fulmi-coton; la résistance peut être, dans ce cas, équivalente à 6 kilomètres environ de fil télégraphique. Lorsque la résistance diminue, on peut intercaler dans le circuit une série d'amorces, et la batterie de 20 couples peut les enflammer avec une seule décharge.

Comme le fait remarquer M. Planté, les appareils d'induction servent déjà dans le même but, mais ils exigent un circuit d'un isolement plus parfait et des amorces à circuit interrompu qui ne permettent pas l'exploration de l'ensemble du circuit au galvanomètre.

Application aux usages domestiques ; briquet de Saturne. Tout le monde connaît ce petit appareil qui permet d'obtenir facilement du feu, soit pour l'allumage des bougies, des becs de gaz, ou pour d'autres usages domestiques.

La boîte (fig. 31) contient un petit accumulateur dont les pôles aboutissent aux pinces métalliques *A* et *B* qui serrent un mince fil de platine. Le circuit est disposé de manière qu'en pressant du doigt sur la touche métallique *C*, le courant traverse le fil de platine et le rougit suffisamment pour enflammer un corps combustible *D*, une bougie, par exemple.

Fig. 31.

M. Planté recommande, pour charger son petit couple, l'emploi de 3 éléments de Daniel ou de Callaud. Les couples Leclanché ne peuvent servir avec avantage, car la charge exige que le circuit reste presque toujours fermé, ce qui diminuerait trop rapidement la force électro-motrice des Leclanché.

L'inflammation d'une bougie sous l'influence du platine rougi au blanc ne nécessite pas l'usage d'allumettes

qui produisent un développement de fumée, d'odeur et de gaz délétère ou suffocant.

En 1881, MM. les ingénieurs Durand et Hubert se sont servi très avantageusement de l'incandescence d'un filament de platine pour le rallumage des lampes de mineurs dans les charbonnages à grisou.

C'est surtout pour l'allumage du gaz que les piles secondaires sont favorables, car l'inflammation du gaz est plus rapide et n'exige pas l'incandescence d'un fil de platine aussi gros que l'inflammation d'une bougie.

Le briquet de Saturne peut se trouver en dérivation dans le circuit de sonneries électriques qui peuvent parfaitement marcher au moyen de couples secondaires.

Application aux freins électriques pour chemins de fer. M. Planté avait déjà, en 1868, conseillé l'emploi des couples secondaires pour produire de puissants effets magnétiques à l'aide d'une faible source d'électricité.

M. Achard a mis très heureusement cette idée en pratique en lançant un courant énergique dans une série d'électro-aimants qui font partie de ses freins électriques.

Il y a beaucoup à faire dans cette voie.

Application a l'analyse eudiométrique de l'air. D'après M. Planté, l'inventeur d'un grisoumètre, M. Coquillon, profiterait de l'incandescence d'un fil de palladium qui remplace le fil de platine dans les applications précédentes, pour déterminer la combinaison de l'air et de l'hydrogène protocarburé dans son grisoumètre.

Application a la production de signaux lumineux. Il s'agit simplement de mettre en pratique cette propriété qu'une batterie d'accumulateurs, étant chargée pendant quelques minutes par deux éléments Bunzen, a la faculté de produire un arc voltaïque de quelques secondes et d'une très grande intensité.

MM. Niaudet et Morin se sont beaucoup préoccupés de cette application ; mais ces deux savants recommandaient l'emploi de la machine Gramme ou d'une magnéto-électrique pour charger les batteries secondaires.

Depuis 1881, cette question a fait un très grand pas, grâce aux dynamos qui se répandent journellement dans le monde entier.

Application a la production de la lumière électrique dans quelques cas particuliers. Les lampes à incandescence n'existaient pas encore lorsque M. Planté fit paraître son magistral ouvrage. L'éclairage électrique a marché à pas de géant depuis l'exposition de 1881. Il sera donc intéressant, pensons-nous, de lire l'opinion de Planté, émise deux années avant cette exposition.

« Dans certaines circonstances, dit Planté, où l'on a besoin d'une lumière assez vive prolongée seulement pendant quelques minutes, soit pour des expériences de projection, soit pour toute autre étude, la batterie de six grands couples peut répondre au but que l'on se propose. La lampe électrique de M. Reynier permet d'obtenir, même avec cette faible tension, de bons résultats. Comme cette lampe présente une assez

grande résistance, si on emploie des charbons à faible diamètre, la dépense de l'électricité emmagasinée pendant deux heures, dans la batterie secondaire, est assez lente, et, par suite, la production de la lumière peut durer jusqu'à un quart d'heure.

« En faisant usage d'un plus grand nombre de ces couples de grande dimension réunis en deux ou trois batteries, on obtiendrait une lumière très vive et d'assez longue durée pour rendre des services dans certains cas. »

Cet énoncé est plus profond qu'on se l'imagine *à priori*.

En effet, la question de la résistance du circuit extérieur est énoncée tout au long, ainsi que celle d'un débit trop considérable.

Augmentez la résistance des lampes et diminuez-en le débit, vous réalisez les lampes à incandescence qui devaient apparaître quelques mois après la publication de l'œuvre de Planté. Si ces deux points avaient été obtenus, Planté eût pu dire avec plus de force : « On obtiendra une lumière d'assez longue durée pour rendre des services dans certains cas. » Au lieu de « certains cas », nous pouvons mettre aujourd'hui « dans tous les cas ».

Application a la division de la lumière électrique. Le problème que voulait résoudre M. Planté consistait à obtenir un arc voltaïque au moyen de deux éléments Bunzen chargeant une batterie secondaire à lames de plomb de quarante petits éléments. Il suffisait, d'après Planté, de faire tourner un commutateur *ad hoc* avec

une vitesse suffisante pour que, la charge s'effectuant en quantité, la décharge pût suffire à produire un arc voltaïque continu.

Deux grands éléments Bunzen fournissant plusieurs arcs semblables, on obtenait, par l'intermédiaire des courants secondaires, une solution du problème de la division de la lumière électrique. Cette question aura sans doute été abandonnée vis-à-vis des grandes découvertes qui ont marqué ces dernières années; on est parvenu par des moyens d'une simplicité beaucoup plus grande à résoudre le problème que s'était posé Planté.

Application des effets physiologiques produits par les batteries secondaires. La thérapeutique pourrait tirer un parti utile des accumulateurs par suite de la grande résistance à la conductibilité du corps humain.

Applications diverses. Chaque fois qu'il s'agit de produire, à un moment donné, un puissant effet électrique temporaire, *de quantité ou de tension*, on peut appliquer les batteries secondaires. M. Planté cite les cas suivants :

1° La transmission de l'heure simultanément à plusieurs points;

2° Certaines expériences spectroscopiques;

3° L'industrie de la dorure et de l'argenture électrochimique;

4° La perception des signaux sur certaines lignes télégraphiques imparfaitement isolées;

5° La galvanoplastie en ronde-bosse.

Telles sont, résumées brièvement, les applications que l'inventeur des accumulateurs avait préconisées avant 1879.

Depuis cette époque un événement considérable s'est produit dans le domaine de la science électrique. L'exposition de Paris a montré au monde émerveillé la prodigieuse fécondité des applications de l'électricité.

Avant cette exposition, on parlait assez vaguement de quelques applications qui, suivant l'expression de M. de Parville, étaient bien comme dans l'air; mais elles avaient besoin d'une occasion pour se produire et s'affirmer; c'est pourquoi l'on peut dire que l'exposition de Paris a ouvert une ère nouvelle aux progrès de la science qui doit gouverner l'avenir.

Nous allons maintenant étudier les applications industrielles des accumulateurs. On se convaincra, de cette manière, de l'utilité de ces appareils que l'on a tant discrédités dans ces derniers temps.

§ 2.

APPLICATION DES ACCUMULATEURS A L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

L'éclairage à l'huile et l'éclairage au gaz résultent de la combustion de l'huile et du gaz qui alimentent la source lumineuse. L'éclairage électrique, au contraire, ne nécessite pas l'intervention d'un corps combustible; la lumière électrique est le résultat d'une transformation des forces physiques.

Lorsqu'un courant électrique circule dans un fil conducteur, celui-ci oppose une résistance à la marche du courant. L'un des effets de cette lutte de force, comme dit M. Swan, est la production de chaleur. Cette quantité de chaleur est liée, d'une part, à l'intensité du courant qui passe dans le circuit, et, d'autre part, à la résistance du conducteur, c'est-à-dire à la nature du fil, à sa longueur et à sa section. Si, sur un circuit conducteur, se trouvent certains espaces très restreints qui présentent une grande résistance électrique, il se produit, en ces points, un fort échauffement qui peut amener une vive incandescence.

Lorsque la partie du conducteur qui est portée à l'incandescence est gazeuse, la lumière s'appelle *arc voltaïque*. Pour que celui-ci devienne éblouissant, il est nécessaire que des particules métalliques ou charbonneuses soient entraînées au sein de l'arc.

Lorsque la section échauffée du conducteur est solide, on a l'éclairage *par incandescence.*

Nous allons immédiatement étudier l'*application des accumulateurs à l'éclairage électrique des lampes à incandescence.*

Nous avons dit antérieurement que si, dans le circuit extérieur d'une batterie d'accumulateurs capable d'éclairer une lampe de 100 volts, par exemple, on introduit 10, 15, 20 nouvelles lampes, l'intensité lumineuse de chaque foyer diminuait au fur et à mesure que le nombre augmentait. Nous avons ajouté qu'il était donc nécessaire de majorer le nombre d'éléments pour maintenir la même clarté.

Démontrons le fait théoriquement.

Un accumulateur électrique a trois constantes : la force électro-motrice e, la résistance intérieure r et le débit de régime i. A l'article relatif à la décharge nous avons montré que le débit $i = \frac{e}{r + R}$, dépendait surtout de la résistance du circuit extérieur. Nous avons vu que i est maximum quand le travail produit dans le circuit extérieur est nul; on a alors $R = 0$ et $i = \frac{e}{r}$, c'est-à-dire que la pile est fermée sur elle-même.

Quand $r = R$, le travail est maximum, et le débit $i = \frac{e}{2r}$. Enfin, le débit diminue quand R augmente, et, au delà du point pour lequel $r = R$, on a la région favorable dans laquelle le rendement augmente.

En pratique, on recherche surtout un rendement

élevé et l'on ne s'applique pas tant à tirer de l'accumulateur la plus grande quantité de travail par seconde, c'est-à-dire par unité de temps. De ce chef, on fera donc i le plus petit possible.

Il est, d'ailleurs, une autre considération qui commande de donner à i une faible valeur; nous voulons parler de la polarisation des accumulateurs. La polarisation n'est pas la même pour tous les systèmes; ainsi les éléments à base de plomb sont beaucoup plus polarisables que ceux à dissolution saline; de plus, il est clair que les dimensions des couples jouent, à ce point de vue, un rôle important. Avec les accumulateurs au plomb, le *régime* de décharge varie de $0^{\text{amp.}},25$ à un ampère par kilogr.; pour ceux au cuivre, on peut aller jusqu'à deux ampères, et pour les éléments au zinc, ce chiffre peut être poussé jusqu'à trois. Chaque système de pile secondaire a donc un certain débit *de régime* qui doit être renseigné par le constructeur.

Les lampes à incandescence possèdent également trois constantes :

1° La différence de potentiel aux extrémités des attaches du filament de charbon e';

2° Le débit de la lampe, exprimé par le nombre d'ampères qui la traversent par seconde, i';

3° La résistance r' à chaud qui est environ la moitié de la résistance à froid.

Nous allons supposer qu'on dispose d'une batterie

d'accumulateurs réunis tous en tension ; recherchons quel sera le nombre d'éléments x nécessaire pour éclairer une seule lampe à incandescence dont les trois constantes sont e', i', r', liées par la relation $i' = \frac{e'}{r'}$.

Puisqu'il n'y a qu'une seule lampe à éclairer, il faudra, pour l'alimentation de cette lampe, une quantité d'électricité égale à i' par seconde.

Quant à l'intensité du courant fourni par la batterie d'accumulateur, nous l'obtiendrons en appliquant la loi générale de Ohm $I = \frac{E}{r + R}$.

Dans le cas qui nous occupe, on a :

la force électro-motrice, $E = xe$;

la résistance intérieure de la batterie, xr ;

la résistance extérieure est la résistance de la lampe, r'. (Nous faisons abstraction, pour le moment, de la résistance des fils conducteurs.)

En substituant dans la formule de Ohm, nous avons :

$$I = \frac{xe}{xr + r'}, \quad \text{d'où :} \quad x = \frac{r'I}{e - rI}.$$

Or, I est aussi l'intensité du courant qui traverse la lampe ; donc : $I = i'$, et, en multipliant par r'' les deux membres,

$$r'I = r'i' = e', \quad \text{d'où :} \quad x = \frac{e'}{e - rI}. \qquad (a)$$

Exemple. Prenons des accumulateurs dont les constantes sont :

$$e = 2^{v.},15,$$
$$r = 2^{ohms},02,$$
$$i = 20 \text{ ampères.}$$

Les constantes de la lampe qu'il s'agit d'éclairer sont, par exemple :

$e' = 100$ volts ;

$i' = 1$ ampère ;

$r' = \frac{e'}{i'} = \frac{100}{1} = 100$ ohms (à chaud).

En remplaçant, dans la formule *(a)*, les lettres par leurs valeurs respectives, on trouve :

$$x = \frac{100}{2,15 - 0,02 \times 1} = \frac{100}{2,13} = 46,4,$$

et comme il est avantageux de prendre le chiffre immédiatement supérieur, on voit que 47 éléments sont nécessaires pour l'éclairage d'une seule lampe dont les constantes sont données ci-dessus.

Nous allons montrer que si l'on introduit n' nouvelles lampes dans le circuit extérieur (en dérivation), le nombre 47 doit être augmenté.

En effet, la formule *(a)*, $x = \frac{e'}{e - rI}$, est encore exacte dans ce cas; mais I, appliqué à l'alimentation des n' lampes, est égal à $n'i'$; donc on a : $x = \frac{e}{e - rn'i'}$ si n' augmente, le dénominateur diminue et la valeur de x augmente.

Cette dernière formule étant appliquée à l'éclairage de vingt lampes, donne pour x la valeur suivante :

$$x = \frac{100}{2,15 - 0,02 \times 20\text{l.} \times 1\text{amp.}},$$

d'où : $x = \frac{100}{2,15 - 0,4} = \frac{100}{1,75} = 57,2$, soit 58.

On reconnaît donc que l'introduction de nouvelles

lampes dans le circuit nécessite une augmentation rapide du nombre d'éléments à grouper en tension.

Il y a lieu de faire la remarque suivante :

La valeur de x peut grandir si I ou r augmente. Si la résistance intérieure des couples n'avait été que de $0^{ohm},01$, on aurait trouvé, pour l'éclairage de vingt lampes :

$$x = \frac{100}{2,15 - 0,01 \times 20 \times 1} = \frac{100}{1,95} = 51,3,$$

soit 52 au lieu de 58.

De ce qui précède découle la conséquence que, dans l'application des accumulateurs à l'éclairage, on doit rechercher des éléments à très faible résistance intérieure.

Dans l'exemple que nous avons pris, nous avons vu que le débit de régime i des accumulateurs était de 20 ampères. Comme chaque lampe du type que nous avons choisi demande un ampère, il se fait que notre batterie d'accumulateurs ne sera pas capable d'alimenter, dans les conditions les plus avantageuses, un nombre supérieur à 20 lampes de 1 ampère.

S'il s'agit d'un éclairage de 100 lampes, demandons-nous quelle sera la marche à suivre au sujet du groupement des piles secondaires.

Puisqu'une seule batterie d'éléments groupés tous en tension ne peut débiter qu'un courant de 20 ampères, il est clair que nous devrons réunir *en quantité* plusieurs séries semblables.

Dans ce cas, la formule *(a)* est légèrement modifiée.

En effet, la résistance intérieure de la batterie qui, tantôt, était égale à xr, devient ici $\frac{xr}{y}$, en désignant par y le nombre d'éléments groupés en quantité.

Pour déterminer la valeur de y, il suffit de remarquer que I étant le courant fourni par la batterie totale et i le débit de régime des éléments, on doit évidemment avoir $y = \frac{I}{i}$.

Quant à x, nous l'obtiendrons, comme tantôt, au moyen de la formule de Ohm :

$$I = \frac{xe}{\frac{xr}{y} + \frac{r'}{n'}},$$

d'où, après transformation, l'on tire :

$$x = \frac{ye'}{ye - rI}.^{1} \qquad (b)$$

Cette formule va nous permettre de déterminer tous les facteurs du groupement des accumulateurs dans le cas d'un éclairage de 100 lampes.

Chaque lampe ayant une constante de un ampère, les 100 lampes (placées en dérivation) exigeront un courant de 100 ampères; I = 100 ampères. Le débit de régime des accumulateurs étant de 20 ampères, $y = \frac{100}{20} = 5$. Il faudra donc employer 5 séries. Si la division de $\frac{I}{i}$ ne donnait pas un nombre entier, on prendrait le chiffre immédiatement supérieur, à moins toutefois qu'on ne

1. Cette formule générale a été développée, avec application numérique, dans un bel article de M. Hospitalier, paru dans le numéro du 15 juin 1882 de *l'Électricien*.

se croie en droit de majorer quelque peu le débit de régime i.

En ce qui concerne le nombre d'éléments entrant dans chaque série, la formule *(b)* donne :

$$x = \frac{5 \times 100}{5 \times 2{,}15 - 0{,}02 \times 100 \times 1} = \frac{500}{8{,}75} = 57{,}1.$$

Le nombre total d'éléments sera ainsi de

$$5 \times 57 = 128.$$

Si la résistance intérieure n'était que de $0^{\text{ohm}},01$, x serait égal à $\frac{500}{9{,}75} = 51{,}3$, et le nombre total d'éléments serait de $5 \times 52 = 260$.

Supposons, pour un instant, que nous considérions le débit de régime comme étant de 1 ampère par kilogr. d'électrode. Le débit, $i = 20$ ampères, que nous avons admis indique donc que le poids de chaque élément est de 20 kilogrammes.

L'éclairage de 100 lampes (r étant de $0^{\text{ohm}},02$), demandera une batterie dont le poids total sera de $285 \times 20 = 5\,709$ kilogrammes.

Si la résistance intérieure n'est que de $0^{\text{ohm}},01$, le poids n'est plus que de $260 \times 20 = 5\,200$, soit 500 kilogrammes d'électrodes en moins.

Supposons maintenant qu'au lieu de grouper plusieurs séries en quantité, on n'ait pris qu'une seule série d'éléments pesant chacun 100 kilogrammes, de manière que le débit reste de 1 ampère par kilogr. d'électrode.

Alors la formule $x = \frac{e'}{e - r\text{I}}$ devient :

$$x = \frac{100}{2{,}15 - 0{,}01 \times 100 \times 1} = \frac{100}{1{,}15} = 87 \text{ en chiff. ronds.}$$

Le poids total de la batterie sera de

$$87 \times 100 \text{ kilogr.} = 8\,700 \text{ kilogr.},$$

au lieu de 5 200 kilogr. que nous avons obtenu tantôt.

Cette grande différence de 8 700 — 5 200 = 3 500 kil. est bien propre à faire saisir l'immense avantage qui résulte d'un bon groupement des éléments de la batterie.

Dans tout ce qui précède nous avons fait abstraction de la résistance des fils conducteurs. En simplifiant, de cette munière, les formules à appliquer dans chaque cas spécial, nous avons montré, d'une façon très simple, que : *1° les accumulateurs appliqués à l'éclairage doivent avoir la plus faible résistance intérieure possible, et 2° que l'association d'un certain nombre de séries en quantité présente, au point de vue du poids total de la batterie, un immense avantage sur l'emploi d'une batterie unique.*

Ces résultats restent vrais quelle que soit la résistance des conducteurs électriques. Si l'on veut tenir compte de ce dernier facteur, que nous appellerons r', en partant de l'équation $I = \frac{xe}{xr + r' + r''}$, la formule *(a)* devient :

$$x = \frac{r'I + r''I}{e - rI} = \frac{e' + r''I}{e - rI}, \qquad (a')$$

et la formule *(b)* est alors :

$$x = \frac{ye' + r''I}{ye - rI}. \qquad (b')$$

La valeur de x augmente, comme on le voit avec r''. Il s'ensuit que, dans les applications, l'on doit chercher

à rendre r'' aussi faible que possible, ce que l'on obtient en donnant aux conducteurs une forte épaisseur. Mais cette dernière considération entraîne, d'un autre côté, une dépense considérable, attendu que le prix des fils augmente avec le diamètre. Or, si le diamètre est trop faible, la déperdition d'énergie devient importante et réclame une majoration du nombre d'éléments, d'où résulte aussi un accroissement de dépense. Il s'ensuit donc que, lorsqu'il s'agit de faire une installation d'éclairage de lampes à incandescence, au moyen d'accumulateurs, il y a lieu de mettre en ligne de compte, d'une part, le coût du nombre d'accumulateurs nécessaire pour tel et tel diamètre du conducteur, et, d'autre part, la dépense de ce dernier. On établit alors une certaine proportion qui permet de réaliser le système le plus économique.

Dans les formules *(a')* et *(b')* nous introduisons la résistance globale des conducteurs du circuit extérieur. Ces formules ne sont rigoureusement exactes que si les n' lampes sont placées toutes au même point, à une distance déterminée de la batterie, les conducteurs ayant précisément une résistance égale à r''.

En pratique, les choses ne se passent généralement pas de la sorte; il arrive le plus souvent que les lampes sont réparties en une série de points du circuit; elles sont ainsi espacées l'une de l'autre d'une certaine longueur. Qu'arrivera-t-il, dès lors, si l'on se contente de les placer simplement en dérivation, en employant partout les mêmes épaisseurs de fils?

Considérons la figure ci-dessous. En a se trouve une lampe, en b une deuxième lampe, en c une troisième, et

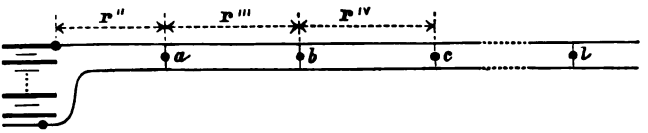

Fig. 32.

ainsi de suite. La résistance du conducteur allant de la batterie à la lampe a est supposée égale à r''; de a en b se trouve une résistance r'''; puis r^{IV} de b en c, etc.

La formule que nous devrons appliquer pour

la lampe a sera : $x_1 = \frac{e + r''I}{e - rI}$,

" b " $x_2 = \frac{e + r''I + r'''I}{e - rI}$,

" c " $x_3 = \frac{e + r''I + r'''I + r^{IV}I}{e - rI}$.

(Les lampes a, b et c sont supposées seules.)

On conçoit que si r''', r^{IV}, ... , sont relativement grands, la valeur de x augmentera au fur et à mesure que les lampes seront plus espacées. Mais si la lampe c exige, par exemple, 50 éléments en tension, alors que 48 suffisent pour éclairer a, n'est-il pas évident que la lumière de a sera beaucoup plus intense que celle de c, et n'arrivera-t-il pas un moment où le nombre de volts nécessaire pour éclairer la lampe b, fera éclater le filament de a ?

Que faut-il donc faire dans des cas semblables? C'est, croyons-nous, en prenant un exemple pratique que l'on

pourra le mieux se faire une idée exacte du procédé à adopter.

Prenons un établissement industriel représenté par la fig. 33, page suivante.

Supposons que les besoins des ouvriers réclament, dans la salle *A B D C*, douze lampes à incandescence de vingt bougies, dans *C E F G*, dix de vingt bougies, dans *D H I J*, vingt de dix bougies, et dans la partie à découvert, trois de cinquante bougies.

La batterie d'accumulateurs étant en *M*, quelle est la disposition la plus favorable du placement des fils conducteurs ?

Si, partant de *M* vers la droite, on suivait le tracé indiqué en ponctué, et si on se contentait de placer les lampes les unes à la suite des autres, il arriverait que les premières seraient fortement éclairées, alors que les dernières rougiraient à peine, à moins que les conducteurs n'aient une épaisseur énorme, ce qui serait extrêmement coûteux. Pour donner le même éclat à toutes les lampes, il faudrait employer des lampes dont la force électro-motrice irait en diminuant de la première à la dernière, ou bien calculer *la résistance qu'il y aurait lieu d'introduire à chaque lampe pour que la valeur* $x = \frac{e + r''I}{e - rI}$, *prise isolément, restât la même pour chacune d'elles.*

Ceci amènerait l'obligation d'installer de véritables rhéostats pour les lampes les plus rapprochées de la batterie.

Ce n'est pas ainsi que l'on procédera en pratique ;

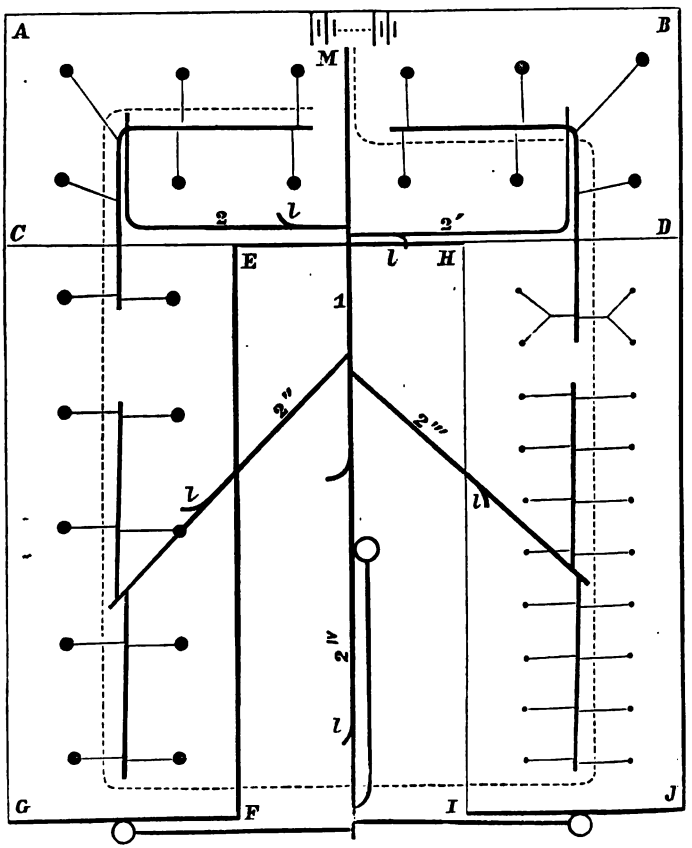

Fig. 33.

voici comment on s'y prendra : On placera d'abord un circuit principal 1 sur lequel on branchera 5 circuits secondaires indiqués par le chiffre 2. On s'arrangera de manière que la résistance présentée par ces 5 circuits secondaires, en y comprenant celle des lampes qu'ils devront allumer, soit sensiblement la même pour chacun d'eux. La quantité d'électricité qui passera dans les cinq 2 étant à peu de chose près égale, il est clair que cette disposition revient à placer, à la même distance de la batterie, 5 lampes absorbant la quantité d'électricité nécessaire à chaque groupe. Dans ces conditions, ces 5 lampes auront la même intensité lumineuse.

Ce qui précède montre donc qu'il suffit de répartir les lampes en un petit nombre de groupes éloignés de la batterie d'une longueur sensiblement égale à la distance moyenne qui correspond à chacun d'eux.

Admettons, pour un instant, que toutes les lampes soient allumées ; on calcule aisément, comme nous l'avons montré ci-dessus, le nombre de séries d'accumulateurs qu'il faut réunir en quantité et le nombre d'éléments entrant dans chaque série, au moyen des formules : $y = \frac{I}{i}$ et $x = \frac{ye' + r''I}{ye - rI}$.

Nous allons supposer que les constantes des lampes soient :

pour 10 bougies :	pour 20 bougies :	et pour 50 bougies :
$e' = 100$ volts,	$e' = 100$ volts,	$e' = 100$ volts,
$i' = 0^{\text{amp.}},3$,	$i' = 0^{\text{amp.}},6$,	$i' = 1^{\text{amp.}},5$,
$r' = \frac{100}{0,3} = 333^{\text{ohms}}$.	$r' = \frac{100}{0,6} = 166^{\text{ohms}}$.	$r' = \frac{100}{1,5} = 66^{\text{ohms}}$.

Lorsque toutes les lampes éclairent, le courant qui doit les alimenter est de

$$20 \times 0^{a.},3 + 22 \times 0^{a.},6 + 3 \times 1^{a.},5 = 23^{a.},7.$$

Si l'on se sert d'accumulateurs dont le débit de régime est de 20 ampères, on a :

$$\frac{I}{i} = \frac{23,5}{20} = 1,18;$$

nous prendrons le chiffre immédiatement supérieur, c'est-à-dire 2, parce que nous avons admis que le débit de régime était de un ampère par kilogr. d'électrode, et que, dans les applications, on ne peut pas dépasser, comme nous l'avons vu antérieurement, la valeur de un ampère par kilogr. Pour obtenir x, nous allons déterminer les valeurs des différents facteurs qui entrent dans l'expression $\frac{ye' + r''I}{ye - rI}$.

On a immédiatement :

$$y = 2,$$
$$e' = 100 \text{ volts},$$
$$I = 23^{a.},7,$$
$$e = 2^{v.},15,$$
$$r = 0,02.$$

Il ne reste à connaître que r'' qui comprend la résistance du circuit principal 1, des circuits secondaires et des fils d'attache des lampes aux circuits secondaires. Par la subdivision des lampes en groupes, il suffit de calculer la résistance d'un seul circuit secondaire, y compris la résistance des fils d'attache ; on multipliera ensuite la résistance ainsi obtenue par 5.

Supposons que l'on ait :

résistance de 1 = $0^{ohm},25$,

résistance totale de 2 = $0^{ohm},35$, d'où :

résistance des cinq 2 = $5 \times 0,35 = 1^{ohm},75$,

et, par conséquent,

la résistance totale $r'' = 0,25 \times 1,75 = 2^{ohms},00$.

En substituant dans la formule, on a :

$$x = \frac{2 \times 100 + 2,00 \times 23,7}{2 \times 2,15 - 0,02 \times 23,7} = 64,3, \text{ soit 65 couples.}$$

Le nombre total d'éléments entrant dans la batterie sera donc de :

$$2 \times 65 = 130, \quad \text{pesant :} \quad 130 \times 20^{k.} = 2\,600^{k.}.$$

Après avoir déterminé tous les éléments qui doivent entrer en ligne de compte, lorsque toutes les lampes éclairent en même temps, nous allons examiner certaines particularités intéressantes qui vont se présenter lorsqu'on supprime du circuit soit un, deux, etc. groupes, et puis une, deux, etc. lampes appartenant aux divers groupes.

Supposons qu'à un instant donné, on supprime les circuits $2'''$ et 2^{IV} au moyen des interrupteurs du courant représentés par la lettre l. Cette suppression va évidemment réduire r'' qui sera maintenant égal à $3 \times 0,35 + 0,25 = 1,30$, et par suite,

$$x = \frac{2 \times 100 + 1,30 \times 23,7}{2 \times 2,15 + 0,02 \times 23,7} = \frac{230,55}{3,83} = 60.$$

Ici se pose la question suivante : Faut-il supprimer cinq éléments dans chaque série, ou bien n'est-il pas préférable de manœuvrer un rhéostat installé sur le

circuit principal, qui introduira des résistances variables destinées à remplacer en quelque sorte les groupes supprimés ?

A notre avis, cette question dépend du genre d'accumulateurs dont on se sert pour l'eclairage.

S'il s'agit de couples secondaires, genre Planté, à

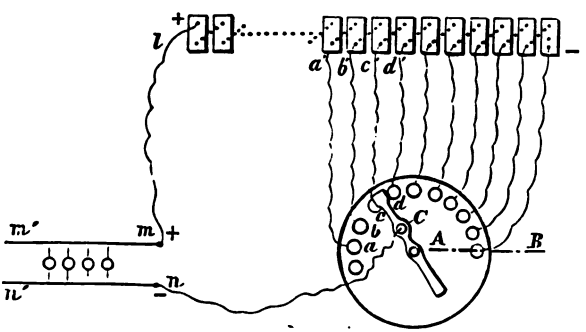

Fig. 34.

dépôt naturel de matière active, nous croyons qu'il est préférable d'employer le premier procédé. On se sert, dans ce cas, d'un commutateur analogue à celui que nous avons combiné et qui est représenté par les fig. 34 et 35. *C* est relié électriquement à l'extrémité de la manivelle qni vient en contact avec les pièces de cuivre *a, b, c.*

Coupe AB.

Fig. 35.

Il est vrai qu'un certain nombre d'éléments devront toujours travailler, qu'il s'agisse d'éclairer

une seule lampe ou les 5 groupes de lampes réunis, alors que quelques-uns ne fonctionneront que lorsqu'on ajoutera de nouveaux groupes. Il va donc résulter une surcharge de ces derniers éléments. Si l'on se sert de nos couples à fils, cette surcharge n'a d'autre effet que de peroxyder un peu plus profondément les plaques positives de ces couples supplémentaires. Comme leur durée est extraordinairement longue, cette peroxydation ne présente guère un grand inconvénient.

D'un autre côté, il y a lieu de remarquer que si l'on conservait toujours le même nombre d'éléments en recourant à des résistances, celles-ci consommeraient en pure perte une grande quantité d'électricité. Cette dépense inutile compense largement le défaut qui résulte d'une surcharge d'éléments à dépôt naturel.

Je sais bien que si l'on se plaçait à un point de vue exclusivement théorique, il faudrait proscrire, d'une façon absolue, un tel procédé; mais il se présente souvent des cas où la pratique commande parfois de n'user de la théorie que dans une certaine proportion. Je parle ici par expérience et je déclare franchement que le procédé que je préconise m'a donné de très bons résultats.

S'il s'agissait, au contraire, d'accumulateurs à dépôt artificiel, la surcharge aurait un inconvénient beaucoup plus grave, car il diminuerait considérablement la durée déjà fort réduite de ce système de piles secondaires. Nous croyons cependant (c'est le procédé que nous employons avec beaucoup de succès depuis quelque temps) qu'il est très avantageux de combiner, dans des

cas semblables, les couples à dépôt naturel avec les couples à dépôt artificiel. Voici comment on procède :

Les éléments qui doivent toujours travailler quel que soit le nombre de lampes éclairées sont à dépôt artificiel, tandis que les éléments supplémentaires qui ne fonctionnent que lorsque le nombre de foyers lumineux augmente sont à dépôt naturel. La charge de ces deux batteries peut, d'ailleurs, se faire d'une façon indépendante, et il suffit d'un simple commutateur pour effectuer le groupement convenable pendant la décharge.

Imaginons maintenant qu'on veuille supprimer une, deux, etc. lampes d'un groupe quelconque, les autres groupes éclairant complètement. La suppression de ces quelques lampes aura pour effet d'accroître l'intensité lumineuse des lampes restantes de ce groupe, et pour éviter que cet éclat ne devienne exagéré, il suffit que l'interrupteur *l* soit muni de faibles résistances dont on variera la puissance à volonté.

Si quatre groupes étaient éteints et qu'on n'éclairerait que deux lampes, par exemple, du cinquième groupe, on pourrait n'agir que sur le nombre d'accumulateurs à introduire dans le circuit et nullement sur les résistances de l'interrupteur.

Enfin, en admettant que la batterie d'accumulateurs chargée par une dynamo se trouve placée à une distance de un kilomètre environ de l'atelier à éclairer, le mécanicien placé près des accumulateurs devra se servir

d'une *lampe-témoin* qui le guidera dans la manœuvre du commutateur ou du rhéostat. Seulement il faut bien se garder de se servir d'une *lampe-témoin* n'exigeant que 100 volts, car il est clair que, près de la source, l'on dispose d'un nombre supérieur à 100 volts. En effet, lorsque toutes les lampes sont allumées, nous avons vu qu'il y avait 65 couples groupés en tension dans le circuit. A raison de 2 volts par élément, on dispose d'une tension de $2 \times 65 = 130$ volts. Cette indication pourra servir de base à ce qu'il y aura lieu de faire à l'usine pour se rendre compte de l'intensité lumineuse des lampes de la fabrique à éclairer.

Les applications numériques qui précèdent s'appliquent, d'une façon plus spéciale, aux accumulateurs à base de plomb; or, nous savons que ces piles secondaires sont beaucoup plus polarisables que les éléments à dissolution saline. Le débit de régime des accumulateurs dépendant surtout du phénomène de *la polarisation*, il s'ensuit que l'on aurait pu admettre avec les accumulateurs au cuivre ou au zinc un débit normal supérieur à un ampère par kilogr. d'électrode. Dans l'exemple que nous avons donné à la page 278, on reconnaît que chaque série serait capable de débiter un courant de 60 ampères (à raison de 3 ampères par kilogr.), et dès lors, au lieu des 5 séries que l'on avait trouvées, il n'y en aurait eu que $\frac{100}{60} = 2$ en chiffres ronds.

Le poids nécessaire pour l'éclairage des 100 lampes serait donc considérablement réduit si l'on se servait,

au lieu de couples à base de plomb, d'accumulateurs à dissolution saline.

Il y aurait ainsi un très grand avantage à se servir de ces derniers dans les applications à l'éclairage, si une nouvelle considération relative à la *durée de l'éclairage* ne devait pas attirer notre attention.

Lorsque nous avons étudié les accumulateurs au point de vue de leur capacité d'emmagasinement, nous avons vu qu'après une durée de formation plus ou moins prolongée, les couples secondaires étaient capables de débiter 12 000, 18 000, 20 000, etc. coulombs par kilogramme d'électrode.

Désignons par q la capacité par kilogr. des éléments d'une batterie destinée à un éclairage; soit N le nombre de kilogr. que renferme chaque couple; s'il y a y séries réunies en quantité, la capacité totale sera $Q = Nyq$. Dans cette formule, on remarque que le nombre d'éléments x entrant dans chaque série n'intervient pas. En effet, le groupement en tension n'a d'autre but que de produire la pression exigée pour vaincre les résistances du circuit extérieur; quant à la capacité, celle-ci est toujours égale à celle d'un seul de ces éléments réunis en tension, lorsqu'il n'y a qu'une seule série.

Supposons maintenant que l'éclairage qui doit être réalisé au moyen d'accumulateurs nécessite une intensité de courant égale à I ampères, ce qui revient à dire que le débit par seconde est de I coulombs. N'est-il pas évident que, si nous divisons la capacité totale

d'électricité disponible dans un élément par le débit I, nous obtiendrons, en secondes, la durée de l'éclairage. On a ainsi : Durée $= \frac{Nyq}{I}$.

Appliquons cette formule au cas renseigné à la page 283.

L'éclairage comporte 22 lampes de 20 bougies, 20 de 10 bougies et 3 de 50 bougies. Quand toutes ces lampes éclairent ensemble, le débit nécessaire pour l'alimentation I est de $23^{a.},7$ par seconde.

Prenons des accumulateurs dont la capacité d'emmagasinement est de 18 000 coulombs par kilogr.; chaque élément pesant 20 kilogr. et la batterie comportant 2 séries en quantité, on a :

$$\text{Capacité} = Nyq = 20^{k.} \times 2 \times 18\,000^{c.}.$$

Ainsi :

$$D = \frac{20 \times 2 \times 18\,000}{23^{a.},7} = 30\,379 \text{ sec.} = 8 \text{ heures } 25 \text{ min.}$$

En se reportant à l'exemple d'un éclairage de 100 lampes au moyen de 5 séries de couples pesant chacun 20 kilogr., on trouve :

$$D = \frac{20^{k.} \times 5 \times 18\,000}{100^{a.}} = 18\,000 \text{ secondes} = 5 \text{ heures};$$

et, au moyen d'une seule série d'éléments d'un poids de 100 kilogr. :

$$D = \frac{100^{k.} \times 18\,000}{100} = 5 \text{ heures.}$$

On obtient ainsi la même durée, mais il y a lieu de remarquer que l'emploi d'une seule série exige 3 500 k. de plus que le fractionnement en 5 séries.

Nous croyons avoir rencontré toutes les particularités qui peuvent se présenter dans l'éclairage de lampes à incandescence alimentées par des accumulateurs électriques.

Si, au lieu de lampes à incandescence, l'on devait éclairer des foyers à arc voltaïque, il y aurait lieu de tenir compte de certaines considérations.

Un foyer à arc voltaïque fonctionne bien au moyen d'accumulateurs électriques, dans le cas où le courant qui l'alimente est continu. Alors, si pour une intensité lumineuse déterminée, on connaît les trois constantes de la source de lumière, e', i' et r', il est évident que la formule *(a)* que nous avons développée en parlant des lampes à incandescence, sera également applicable ici.

Dans les ouvrages qui traitent spécialement de la matière, on trouve qu'il existe une infinité de foyers à arc; on cite entre autres les *régulateurs monophotes* et *polyphotes,* ou *régulateurs à division;* ces derniers comprennent les *régulateurs différentiels* et les *régulateurs à dérivation.* Tous ces régulateurs peuvent fonctionner au moyen de courants continus et, par conséquent, les accumulateurs sont avantageusement employés pour obtenir une fixité convenable de la lumière.

On connaît encore les *bougies électriques* qui exigent, au contraire, des courants alternatifs; dans ce cas, les accumulateurs doivent être écartés.

Enfin, les *lampes à incandescence avec combustion,* ou *à semi-incandescence,* donnent de très beaux

résultats, quand elles sont alimentées par des accumulateurs.

Nous n'entrerons pas dans les détails relatifs à l'éclairage des foyers à arc par accumulateurs; ce sujet nous entraînerait trop loin, vu la grande diversité de ces sources lumineuses. En outre, on ne possède pas des indications assez précises sur les constantes de ces foyers pour une intensité lumineuse déterminée.

En résumé, les accumulateurs électriques trouvent dans l'éclairage une importante application. Malgré le discrédit actuel dans lequel de malheureuses opérations financières semblent les avoir fait tomber, il est incontestable qu'on finira par comprendre que leur emploi est absolument indispensable dans la plupart des éclairages.

Un éminent électricien anglais nous disait dernièrement qu'en Angleterre on paraissait revenir à de meilleures dispositions en faveur des piles secondaires, et que, dans la plupart des installations projetées, on étudiait, avec grand soin, l'application des accumulateurs.

Rappelons-nous qu'à l'origine de l'éclairage au gaz, la cloche fut également l'objet d'attaques aussi vives que les accumulateurs électriques. Cependant la cloche a fini par triompher de tous ses détracteurs, et il en sera certainement de même des accumulateurs. Ceux-ci constituent des réservoirs précieux qui permettront de donner aux lampes à incandescence une durée bien plus longue que celle que l'on obtient par l'éclairage direct au moyen de dynamos.

Que l'on veuille bien se donner la peine de calculer les dépenses énormes nécessitées par le bris continuel des lampes alimentées par des machines et qu'on mette en regard la réduction que permettrait de réaliser l'adjonction d'une petite batterie; on trouvera, dans beaucoup de cas, *une économie notable* en se servant de couples secondaires.

Et puis, compte-t-on pour rien ce degré de fixité de la lumière que l'on peut seulement réaliser au moyen des accumulateurs ?

Peut-on oublier ces extinctions si fréquentes qui se produisent dans l'éclairage sans piles secondaires ? L'extinction des lampes Édison qui a eu lieu lors de l'éclairage du bal masqué, à Anvers, l'année dernière, et le procès qui allait s'en suivre, au dire des journaux, devraient cependant ouvrir les yeux à ceux qui s'obstinent à critiquer ces appareils.

Qu'on nous permette de croire que les critiques qui ont été formulées jusqu'ici sont généralement parties de personnes qui ne savent pas ce que c'est qu'un accumulateur électrique.

§ 3.

APPLICATION DES ACCUMULATEURS A LA TRACTION.

1. — TRACTION DES TRAMWAYS.

Dans tous les essais que l'on a entrepris jusqu'ici sur la traction des tramways au moyen des accumulateurs électriques, on s'est contenté d'installer, sous le plancher de la voiture, la dynamo-motrice et la transmission, et de placer les accumulateurs sous les banquettes.

A notre avis, cette disposition est vicieuse. Nous croyons que la solution pratique du problème réside dans l'adjonction à la voiture d'une petite locomotive électrique portant tous les appareils nécessaires à la traction.

Sans doute, il paraît étonnant à la masse de voir rouler une voiture sans cheval ni locomotive; ce fait est bien propre à exciter son admiration et son enthousiasme. Mais les sociétés exploitant les tramways n'ont pas tant à considérer cette admiration que les avantages qui résultent de la traction électrique. A ce point de vue donc, nous croyons qu'il est préférable de faire traîner la voiture par une petite locomotive électrique, pour le motif qui va suivre.

Pour qu'une batterie d'accumulateurs soit en état d'actionner la dynamo-motrice, pendant une durée de quatre heures, par exemple, il est nécessaire qu'elle

reçoive d'abord sa charge. Or, cette charge exige un temps au moins égal à celui de la décharge; admettons que cette durée soit aussi de quatre heures. Si la batterie d'accumulateurs est placée sur la voiture elle-même, comme la charge se fait à l'usine, il s'ensuit que la voiture devra rester inactive, à l'usine, pendant toute la durée de la charge. Le nombre de voitures que la Société exploitante devra posséder sera donc considérable, et, partant, le capital à engager dans les frais de premier établissement sera énorme.

Si, au contraire, la traction se fait au moyen d'une petite locomotive, la voiture pourra rouler toute la journée; on changera simplement la locomotive qui retournera à l'usine chercher une nouvelle charge, quand celle-ci sera épuisée.

Les appareils électriques restant les mêmes dans les deux cas, il y aura donc à considérer, dans le deuxième cas, les frais résultant du truc qui devra porter tous ces appareils. Or, il est incontestable que les trucs seront infiniment moins coûteux que les voitures elles-mêmes qui devraient être en double dans le premier cas.

De plus, avec une locomotive particulière, on a toute facilité pour la surveillance des appareils, et, en cas d'accident arrivé à l'un d'eux, il suffit d'envoyer à l'atelier de réparation la locomotive, et non la voiture qui devrait encore ici rester inoccupée pendant tout le temps que durerait la réparation.

Nous allons donc envoyer à l'usine une locomotive

électrique chercher sa nourriture, c'est-à-dire que nous allons charger sa batterie d'accumulateurs. Celle-ci reçoit sa charge d'une dynamo qui est actionnée, soit par un moteur hydraulique, soit par un moteur à vapeur. En général, c'est ce dernier moteur qui sera employé.

Nous avons d'abord à tenir compte de la perte d'énergie résultant de la transformation du travail mécanique en travail électrique dans la dynamo chargeuse. Quand on se sert de bonnes dynamos, on peut admettre un coefficient de transformation de 0,85.

Ensuite, nous avons vu à l'article : *Rendement des accumulateurs,* qu'une batterie recevant une charge électrique de cette dynamo peut avoir un rendement de 0,78, quand on se sert d'accumulateurs à base de plomb.

La transformation de l'énergie emmagasinée dans les accumulateurs en travail mécanique sur l'arbre de la dynamo, aura un coefficient d'environ 0,75.

Enfin, la transmission du travail de la dynamo-motrice aux roues nécessitera encore une déperdition telle qu'on ne pourra utiliser que les 0,9 du travail précédent.

En résumé, du travail mécanique produit à l'usine, on ne pourra recueillir, sur les roues motrices, que

$$0{,}85 \times 0{,}78 \times 0{,}75 \times 0{,}90 = 0{,}45.$$

Il est évident que tous ces chiffres se rapportent à une installation soignée et qui aurait été conçue dans des conditions parfaites. Peut-on dire, qu'en pratique, il soit possible de réaliser ce résultat avec les appareils dont on dispose actuellement. La chose n'est pas

impossible, mais je crois que, pour le moment, il est plus sage de dire qu'on ne dépassera pas 35 pour cent du travail produit par le moteur de l'usine.

Le parcours que doit effectuer une voiture de tramways présente des parties en palier, des parties en pente et d'autres en rampe. La vitesse avec laquelle la locomotion circule n'est pas la même sur toute la longueur du parcours, car lorsque la rampe dépasse $0^{m}.01$ par mètre, l'effort à exercer devient trop considérable.

Supposons d'abord que l'on se trouve en palier. Nous admettrons que la vitesse de roulement soit de 3 mètres par seconde.

Désignons par W le travail mécanique à développer en kilogrammètres par seconde; si f est le coefficient de résistance à la traction, V la vitesse de roulement, et P le poids total de la locomotive et de la voiture, on a la formule :

$$W = P \times f \times V. \qquad (1)$$

Dans le cas d'un tramway, on peut admettre $f = 0{,}01$. Quant à P, il comprend :

la voiture pesant environ.	2 000	kilos.
les voyageurs	2 000	»
le truc-locomotive	500	»
les accumulateurs	3 000	»
et les machines dynamos et transmission .	500	»
P = poids total =	8 000	kilos.

Nous avons donc, en vertu de (1),

$$W = 8\,000 \times 0{,}01 \times 3 = 240 \text{ kilogrammètres,}$$

ou : $\frac{240}{75} = 3{,}2$ chevaux-vapeur.

En déterminant l'énergie électrique équivalente, nous allons rechercher comment on devra grouper les accumulateurs électriques.

L'expression du travail électrique exprimé en kilogrammètres par seconde est :

$$W = \frac{EI}{9,81}. \qquad (2)$$

Dans cette expression, nous voyons qu'il y a deux facteurs E et I, c'est-à-dire la force électro-motrice et l'intensité du courant, qu'on pourra modifier de telle sorte que le produit reste le même. Si l'on admet que le courant a un régime de 20 ampères, pour produire un travail de 240 kilogrammètres, on aura :

$$240 = \frac{E \times 20}{9,81}; \quad \text{d'où :} \quad E = 117^{\text{volts}},7,$$

soit 118 volts en chiffres ronds.

Mais il est à remarquer que les 240 kilogrammètres expriment le travail qui doit être produit sur les roues motrices. Or, le travail électrique emmagasiné dans les accumulateurs ne peut être transmis aux roues motrices qu'avec une déperdition évaluée, en chiffres ronds, à 35 pour cent.

Par conséquent, les 240 kilogrammètres devront être majorés de 35 pour cent, soit 84 kilogrammètres, de telle manière que les accumulateurs seront forcés de fournir un travail de 240 + 84 = 324 kilogrammètres par seconde. Si nous admettons que le régime du

courant fourni par les accumulateurs à la dynamo-motrice est de 20 ampères, nous aurons :

$$324 = \frac{E \times 20}{9,81}; \quad \text{d'où :} \quad E = 158 \text{ volts.}$$

Avec des accumulateurs à base de plomb dont la force électro-motrice est de 2 volts, il faudra

$$\frac{158}{2} = 79 \text{ accumulateurs réunis en tension.}$$

Nous avons considéré la marche en palier; examinons maintenant le cas de la marche en rampe, l'inclinaison étant de $0^{m.},01$ par mètre.

La formule du travail mécanique à développer, dans ce cas, est :

$$W = P \times f \times V + P \times i \times V, \qquad (1')$$

formule dans laquelle i représente l'inclinaison par mètre qui est ici égale à $0^{m.},01$.

Nous allons réduire la vitesse V à $2^{m.},50$, et nous aurons alors :

$$W = 8\,000 \times 0,01 \times 2,50 + 8\,000 \times 0,01 \times 2,50 = 400$$

$$\text{kilogrammètres, ou } \frac{400}{75} = 5,3 \text{ chevaux.}$$

Quant à l'énergie électrique développée, en majorant de 35 pour cent les 400 kilogrammètres, nous avons :

$$400 + 140 = 540 \text{ kilogrammètres.}$$

Le régime de marche étant toujours de 20 ampères, on a :

$$540 = \frac{E \times 20}{9,81}, \quad \text{d'où :} \quad E = 264 \text{ volts,}$$

ce qui exige $\frac{264}{2} = 132$ accumulateurs à base de plomb réunis en tension.

Si le régime de marche était de 40 ampères, le nombre 132 se réduirait à $\frac{132}{2} = 66$.

Si la rampe était de 0^{m},05 par mètre, alors que la vitesse ne serait plus que de 1^{m},10, la valeur de W serait :

$$W = 8\,000 \times 0{,}01 \times 1{,}10 + 8\,000 \times 0{,}05 \times 1{,}10 = 528$$

kilogrammètres, ou $\frac{528}{75} = 7{,}0$ chevaux.

En ajoutant la majoration de 35 pour cent dont il est question ci-dessus, on trouve :

$$528 + 184 = 712 \text{ kilogrammètres.}$$

Si le régime est encore de 20 ampères, l'expression

$$712 = \frac{E \times 20}{9{,}81} \text{ donne } E = 350 \text{ volts,}$$

ce qui demanderait :

$$\frac{350}{2} = 175 \text{ accumulateurs.}$$

Le régime de 40 ampères réduirait ce nombre à

$$\frac{175}{2} = 88 \text{ accumulateurs.}$$

Lorsque la marche se fait en pente, on constate que, théoriquement, lorsque l'inclinaison est de 0^{m},01 par mètre, c'est-à-dire lorsqu'elle est égale au coefficient de résistance à la traction, le travail à développer est nul. En effet, l'on a, dans ce cas, la formule :

$$W = P \times 0{,}01 \times V - P \times 0{,}01 \times V = 0.$$

Le travail que le moteur a donc à effectuer en pente va en diminuant depuis la marche en palier jusqu'à la marche en pente de 0^{m},01 par mètre. Si la pente

dépasse $0^{m.},01$, le travail est négatif, c'est-à-dire que l'on doit se servir de freins pour empêcher le véhicule, qui est livré à lui-même, de descendre avec une trop grande vitesse.

Nous n'avons considéré jusqu'ici que le travail résultant de la *traction proprement dite.* Or, lorsque le véhicule part du repos, il y a une dépense de force beaucoup plus importante, qui résulte du *démarrage.* Nous avons alors à tenir compte de la puissance vive du véhicule pendant l'action de la force qui agit sur lui, pour le déplacer.

La formule générale est :

$$W = \frac{P}{2g}(V^2 - Vo^2).$$

Si $Vo = 0$, c'est-à-dire si la voiture part du repos, cette formule devient :

$$W = \frac{P}{2g} V^2.$$

En admettant qu'après la première seconde, la vitesse est de 1 mètre, le travail produit aura été de :

$$W = \frac{8\,000}{2 \times 9,81} \times 1,00^2 = 408 \text{ kilogrammètres,}$$

ou $5^{ch.},3$.

Nous avons dressé un tableau qui permettra de se rendre rapidement compte des effets produits dans les différentes sections d'un parcours que doit effectuer un tramway.

Dans la colonne 1, nous représentons la marche en

palier et suivant les diverses inclinaisons des rampes et des pentes pour lesquelles nous avons déterminé les travaux mécaniques et les facteurs de l'énergie électrique équivalente.

La colonne 2 indique les vitesses afférant à ces inclinaisons. A chacune de ces vitesses correspond le nombre de kilomètres à l'heure renseigné dans la colonne 3.

Les colonnes 4 et 5 font connaître le travail mécanique à développer par seconde, d'une part, en kilogrammètres, et, d'autre part, en chevaux-vapeur.

La colonne 6 indique le nombre de volts que devra produire la batterie d'accumulateurs.

Enfin, dans les colonnes 7 et 8, en admettant un régime de courant de 20 et de 40 ampères, nous avons renseigné le nombre d'accumulateurs qu'il faudrait grouper en tension, en supposant que chaque accumulateur ait une force électro-motrice de 2 volts.

MARCHE DU VÉHICULE EN RAMPE, PALIER ET PENTE.	VITESSE EN MÈTRES PAR SECONDE.	NOMBRE DE KILOMÈTRES A L'HEURE.	TRAVAIL MÉCANIQUE A DÉVELOPPER PAR SECONDE EN		TRAVAIL ÉLECTRIQUE A PRODUIRE PAR LES ACCUMULATEURS : $W = \frac{EI}{g}$ kgmt. par seconde [1].			OBSERVATIONS.
			KILOGRAMMÈTRE.	CHEVAUX-VAP.	VALEUR EN VOLTS DE E POUR I = 20 AMPÈRES.	NOMBRE D'ACCUMUL. A BASE DE PLOMB GROUPÉS EN TENSION. POUR I = 20 AMP.	POUR I = 40 AMP.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rampe de 0,05 m.	1,05	3,780	504	6,7	341	171	86	
» 0,045	1,15	4,140	506	6,7	342	171	86	1. La valeur de g est égale à 9,81 : mais pour la facilité des calculs, nous avons fait $g = 10$.
» 0,04	1,25	4,500	500	6,7	338	169	85	
» 0,035	1,40	5,040	504	6,7	341	171	86	
» 0,03	1,60	5,760	512	6,8	346	173	87	
» 0,025	1,80	6,480	504	6,7	341	171	86	
» 0,02	2,00	7,200	480	6,4	324	162	81	2. Pour calculer E, nous avons majoré de 35 pour cent la valeur du travail mécanique, afin de tenir compte des pertes résultant des transformations d'énergie.
» 0,015	2,20	7,920	440	5,8	298	149	75	
» 0,01	2,50	9,000	400	5,3	270	135	68	
» 0,005	2,80	10,080	336	4,4	227	114	57	
Palier	3,00	10,800	240	3,2	162	81	41	
Pente de 0,005	3,00	10,800	120	1,6	82	41	21	
» 0,01	3,00	10,800	0	0				
» 0,015	3,00	10,800	— 120	— 1,6				
» 0,02	3,00	10,800	— 240	— 3,2				
» 0,025	3,00	10,800	— 360	— 4,8				
» 0,03	3,00	10,800	— 480	6,4				
» 0,035	3,00	10,800	— 600	— 8				
» 0,04	3,00	10,800	— 720	— 9,6				
» 0,045	3,00	10,800	— 840	— 11,2				
» 0,05	3,00	10,800	— 960	— 12,8				

L'examen des chiffres qui figurent dans ce tableau va nous permettre de tirer des conséquences des plus intéressantes au point de vue pratique.

Considérons d'abord la marche du véhicule lorsque le régime est de 40 ampères.

En palier, on trouve, dans la colonne 8, que 41 accumulateurs à base de plomb, groupés en tension, sont suffisants pour assurer au moteur une vitesse de trois mètres par seconde.

Dans une rampe dont l'inclinaison n'est que de $0^{m.}$,005, on constate que, même en réduisant la vitesse de 3 mètres à $2^{m.}$,80, les 41 accumulateurs doivent être portés à 57, ce qui fait une augmentation de 16 éléments.

De 57 nous passons à 68, dans une rampe de $0^{m.}$,01, alors que la vitesse est de $2^{m.}$,50.

Ensuite, nous voyons que lorsque la rampe atteint $0^{m.}$,025, le nombre d'accumulateurs est de 86, et ce nombre se maintient sensiblement (il n'y en a qu'un seul en plus ou en moins) dans les rampes supérieures.

Nous allons classer, en trois groupes, les chiffres qui figurent dans la colonne 8, jusqu'à la marche en palier inclusivement.

Le premier groupe comprendra 86, 86, 85, 86, 87, 86 et 81; le deuxième 41 et le troisième 75, 68, 57.

Voici maintenant comment nous allons effectuer les groupements des accumulateurs.

Le premier groupement comportera 86 éléments réunis en tension ; il servira dans les rampes d'une inclinaison variant de $0^{m.}$,02 à $0^{m.}$,05.

Nous avons trouvé que dans les rampes de $0^{m.},02$ par mètre, 81 accumulateurs étaient nécessaires pour imprimer au véhicule une vitesse de 2 mètres par seconde. Si, au lieu de 81 éléments, nous en groupons 86 en tension, la vitesse de 2 mètres sera un peu accrue. La valeur de cette vitesse peut être facilement déterminée.

En effet, 86 éléments donnent, en moyenne, dans les rampes supérieures à $0^{m.},02$ par mètre, un travail de 504 kilogrammètres, comme on peut le voir dans la colonne 4. Or, l'équation

$$W = P \times f \times V + P \times i \times V$$

étant résolue, en prenant V pour inconnue, donne :

$$V = \frac{504}{8\,000 \times 0{,}01 + 8\,000 \times 0{,}02} = 2^{m.},10.$$

Ainsi donc, en faisant agir 86 éléments dans les rampes de $0^{m.},02$, la vitesse de traction sera de $2^{m.},10$. Le premier groupement des accumulateurs (86 éléments en tension) servira, par conséquent, dans les rampes de $0^{m.},02$ à $0^{m.},05$, et la vitesse ira respectivement en diminuant de $2^{m.},10$ à $1^{m.},05$ par seconde.

Le deuxième groupement s'appliquera à la marche en palier et dans les rampes très faibles. Dans ce cas, les 86 accumulateurs formeront deux séries réunies en quantité, comprenant chacune $\frac{86}{2} = 43$ éléments.

D'après le tableau ci-dessus, la marche en palier exige 41 éléments pour obtenir une vitesse de 3 mètres. Si l'on emploie 43 éléments, le travail mécanique de 240 kilogrammètres devient 255 kilogrammètres, et l'on a :

$$255 = 8\,000 \times 0{,}01 \times V,$$

d'où $V = 3^{m},19$, au lieu de 3 mètres.

On conservera 43 éléments dans les pentes très faibles.

On trouve que dans une rampe dont l'inclinaison est de $0^{m},0025$, la vitesse serait de $2^{m},55$ avec 43 éléments. On peut admettre cette vitesse, et le 2e groupement serait ainsi utilisé en palier et dans les très faibles rampes. C'est ce groupement qui sera, en général, le plus usité.

Enfin, nous adopterons une batterie spéciale, composée de 65 éléments, qui sera employée dans les rampes de $0^{m},0025$ à $0^{m},01$. Nous indiquerons tantôt comment on pourra passer de l'un à l'autre de ces groupements sans produire de variations trop brusques dans le travail électrique.

Nous allons justifier l'emploi de deux batteries d'accumulateurs.

Lorsque des accumulateurs actionnent une dynamo-motrice, il y a évidemment des actions dans deux sens différents, positives dans la batterie, puisqu'elles donnent naissance au courant électrique, et négatives dans la dynamo qui dépense ce courant en travail mécanique.

Désignons par E la force électro-motrice de la batterie d'accumulateurs et par e la force électro-motrice opposée du moteur électrique.

Quand celui-ci est maintenu immobile, si I désigne l'intensité du courant, on a un travail exprimé, en kilogrammètres par seconde, $\frac{EI}{g}$.

Quand le récepteur tourne, l'intensité I diminue et devient $i < I$. L'intensité i du courant qui circule dans le circuit composé des accumulateurs et du moteur résulte de la différence des forces électro-motrices opposées E et e; on peut donc écrire :

$$i = \frac{E - e}{R},$$

R désignant la résistance totale du circuit.

Le travail W devient alors :

$$W = \frac{E(E - e)}{gR}.$$

Cette formule nous montre qu'on peut modifier la valeur de W en faisant varier soit E, soit R.

Quelles sont les conséquences qui résultent des variations de E et de R?

Augmenter ou diminuer E revient à ajouter dans le circuit de nouveaux accumulateurs ou à en supprimer un certain nombre. C'est le procédé qui a été employé, à Paris, dans les expériences de traction électrique des tramways au moyen des accumulateurs Faure; ce procédé est défectueux.

En effet, supposons que, partant avec 41 éléments, on en ajoute de nouveaux au fur et à mesure que l'on rencontre des rampes. Il est clair que ces 41 accumulateurs devront toujours se trouver dans le circuit, non seulement en palier, mais encore dans toutes les rampes qui se présenteront sur le trajet.

Il arrivera un moment où une cinquantaine de couples seront presque épuisés, alors que les autres possèderont encore une grande quantité d'électricité emmagasinée.

La conséquence de cette décharge anormale, c'est que la batterie ne sera plus, dans cet état, capable d'actionner le moteur, attendu que les éléments ne pourront plus fournir une force électro-motrice suffisante. Il faudra donc renvoyer la locomotive à l'usine pour donner à la batterie une nouvelle charge. Cette charge sera également désastreuse, puisque, pour donner aux 50 premiers éléments la charge voulue, on devra surcharger les 36 restants.

Des charges et des décharges effectuées dans des conditions semblables auront pour effet de détruire rapidement la batterie d'accumulateurs [1].

Considérons maintenant les variations de R.

Étant admis qu'il faut 86 éléments pour gravir les rampes qui existent le long du trajet à parcourir, on prendra une batterie d'accumulateurs composée de 86 éléments groupés en tension, puis on introduira dans

---

1. Le raisonnement que nous tenons ci-dessus s'applique aux accumulateurs à base de plomb et *à dépôt artificiel*. Ce sont les seuls qui aient été employés jusqu'ici dans les essais de traction. Nous croyons que les éléments à dépôt naturel ne peuvent guère convenir ici, à cause de la trop longue durée exigée pour obtenir une capacité d'emmagasinement suffisante.

Dans l'application des piles secondaires à l'éclairage, on peut se contenter d'une capacité d'emmagasinement par kilogr. d'électrode beaucoup moindre que dans l'application à la traction ; dans ce dernier cas, en effet, si la capacité n'est pas considérable, il faudra ou bien renouveler très fréquemment la charge des batteries, ou augmenter le poids des couples. On critique déjà le poids actuel ; que dirait-on si on l'augmentait à peu près du double ?

le circuit une série de résistances au fur et à mesure que diminuera le travail à produire.

En définitive, le nombre d'accumulateurs reste toujours le même ; le travail que la batterie fournit est donc constant, mais une partie considérable de ce travail *est perdue par les résistances additionnelles introduites dans le circuit.*

Comme on le voit, dans le premier cas, le travail de la batterie est mal réparti, et dans le second cas, il y a une dépense d'électricité considérable qui n'est pas utilisée.

Voyons comment, au moyen de l'emploi de deux batteries que nous préconisons, l'on pourra diminuer, dans une grande proportion, ces deux inconvénients.

Nous sommes en palier ; c'est le groupement : 43 éléments en tension, 2 en quantité, qui actionne le moteur. Nous arrivons à une rampe de 0^{m}.,01. Par une simple manœuvre d'un commutateur, nous mettons hors du circuit la première batterie ; mais, en même temps, la deuxième batterie commence à fonctionner. Pour passer à une rampe de 0^{m}.,02, c'est cette deuxième batterie que nous supprimons du circuit, tout en introduisant la première dans laquelle les 86 éléments sont groupés en tension. Or, comme les brusques variations d'énergie sont toujours très dangereuses pour la dynamo, on passera d'une batterie à l'autre au moyen d'une série de résistances restreintes.

L'usage que l'on devra faire de ces résistances, comme dépense inutile d'électricité, est insignifiant. En effet,

on ne devra s'en servir, dans ce but, que pour passer d'un groupement à un autre groupement.

On obtiendra donc, par ce moyen, une excellente répartition de la dépense entre tous les accumulateurs et il n'y aura qu'une très faible quantité d'électricité dépensée inutilement.

On objectera peut-être que l'emploi de deux batteries exigera un poids énorme d'accumulateurs électriques et compliquera singulièrement le problème en pratique.

Examinons la valeur que l'on doit raisonnablement attribuer à chacune de ces objections.

Avec un régime de 40 ampères, si les couples de la batterie n'ont pas un poids énorme, le phénomène de la polarisation ne tarde pas à se produire. Il pourra donc arriver que le débit électrique cesse et le véhicule ne pourra plus se mouvoir. Si l'on ne dispose que d'une seule batterie qui devra pourvoir, pendant tout le trajet, au fonctionnement du moteur, il est clair que le poids de chaque couple devra être plus grand que si l'on peut donner aux accumulateurs un certain repos à des intervalles plus ou moins rapprochés.

Dans le cas d'une batterie unique, j'estime que chaque élément devra peser 30 kilos ; de cette manière chaque kilogramme d'électrode fournira par seconde :

$$\frac{40 \text{ amp.}}{30 \text{ k.}} = 1^{\text{amp.}},3.$$

Si l'on se sert de deux batteries, il y a lieu de remarquer que, pendant la plus grande partie du parcours, on se servira du groupement qui comprend deux séries

de 43 éléments. En donnant à chaque couple un poids de 13 kilos, les 40 ampères seront fournis par des accumulateurs associés par 2 en quantité, c'est-à-dire par un poids de $2 \times 13^{k.} = 26^{k.}$; ce qui correspond à

$$\frac{40^{a.}}{26^{k.}} = 1^{a.},5 \text{ par kilogramme.}$$

On peut admettre un tel débit, puisque cette batterie pourra souvent se reposer et *reprendre haleine,* s'il est permis de s'exprimer ainsi.

Quant à la deuxième batterie, formée de 65 éléments, comme elle doit moins travailler que la précédente, nous nous contenterons de donner aux éléments un poids de $20^{k.}$; ce qui fera un débit de :

$$\frac{40^{a.}}{20^{k.}} = 2 \text{ ampères par kilogramme.}$$

Enfin, le groupement n° 1 (86 en tension) ne devant fonctionner que sur une très faible longueur du trajet, donnera un débit de :

$$\frac{40}{13} = 3 \text{ ampères par kilogramme.}$$

La répartition que nous venons d'indiquer est parfaitement rationnelle.

Dans le cas d'une seule batterie, nous aurons un poids de $86 \times 30^{k.} = 2\,580$ kilos,

et dans le second cas, un poids de

$$86 \times 13 + 65 \times 20 = 2\,418 \text{ kilos.}$$

Ce qui précède nous paraît justifier entièrement l'emploi de deux batteries d'accumulateurs.

Considérons maintenant la deuxième objection.

La complication que l'on croit devoir craindre est

loin d'être réelle. Voulant montrer, au contraire, combien la chose est simple, nous avons représenté sur le diagramme fig. 36 les trois combinaisons que nous avons mentionnées ci-dessus.

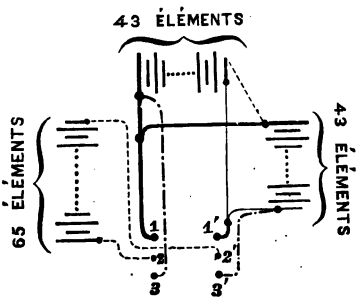

Fig. 36.

Le trait — représente le groupement formé de 43 accumulateurs en tension et 2 en quantité. A ce groupement correspondent les bornes 1 et 1'.

Le circuit des 65 éléments aboutit à 2 et 2'; c'est le trait — — —. Enfin, le trait .—.—.—.— correspond au groupement de 86 couples réunis en tension, les bornes 3 et 3' sont les prises de courant.

Nous avons combiné un jeu de commutateurs qui permet d'obtenir, à volonté, le travail qui correspond non seulement à l'un de ces trois états, mais encore à des situations intermédiaires, grâce à l'emploi de résistances partielles.

Prenons une caisse en bois ou en une autre matière isolante, figures 37 et 38, page suivante.

Une rainure centrale règne sur le fond de la caisse dans toute la longueur de celle-ci, tandis que vers les extrémités se trouve une série de pièces de cuivre; ces dernières sont, par exemple, des têtes de vis dont le pas s'engage dans l'intérieur des bornes placées à la

partie inférieure. Aux bornes 1 1′, 2 2′, 3 et 3′ aboutissent les fils conducteurs H et H′ venant des pôles des

COUPE TRANSVERSALE.

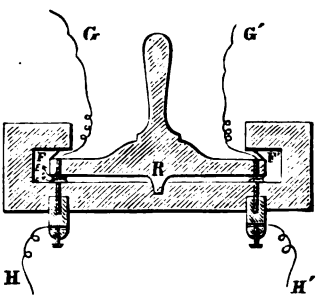

Fig. 37.

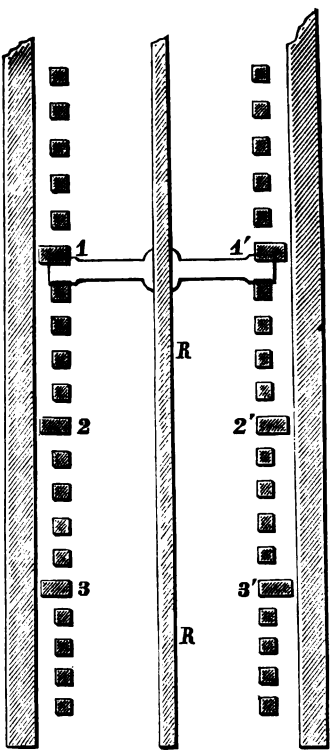

Fig. 38.

pôles des trois groupements des accumulateurs et aux bornes intermédiaires sont intercalées des résistances en fil métallique.

Dans cette espèce de caisse est maintenue une traverse en bois munie d'une partie saillante R qu'on peut déplacer dans la rainure, en agissant sur la poignée. Vers les extrémités de cette traverse se trouvent également deux pièces de cuivre auxquelles sont attachés les conducteurs G et G′ qui vont à la dynamo-motrice. Des ressorts F et F′ assurent un bon contact entre les deux pièces de cuivre de la traverse et celles du fond

de la caisse. On comprend aisément que le conducteur du véhicule devra simplement manœuvrer la traverse pour permettre au courant électrique de passer des accumulateurs à la dynamo, en suivant le trajet H E E' G et H' F' G'.

On reconnaît donc que la difficulté résultant du jeu du commutateur n'est pas réelle et que la deuxième objection disparaît complètement.

En résumé, la traction des tramways par accumulateurs est parfaitement réalisable, et nous avons l'intime conviction que, dans un avenir rapproché, la traction animale sera remplacée, dans un grand nombre de centres importants, par ce système de traction.

La solution que nous avons donnée de l'application des accumulateurs à la traction des tramways, s'applique, d'une façon absolue, à la traction de toute espèce de véhicule.

2. — APPLICATION DES ACCUMULATEURS A LA NAVIGATION.

Des essais importants ont été tentés dans ces derniers temps concernant la propulsion des bateaux au moyen des accumulateurs, et les résultats auxquels on est arrivé sont des plus encourageants. Il est évident que, dans ce cas, le courant d'une dynamo ne peut être transmis directement au véhicule au moyen de fils conducteurs, de sorte que la propulsion électrique des bateaux n'est possible que par accumulateurs. Dans un grand nombre de circonstances, on substituera avec

avantage l'électricité à la vapeur qui, il faut bien le reconnaître, produit un dégagement de fumée et d'odeur tout à fait désagréable. De plus, un bateau électrique permettra de porter un plus grand nombre de passagers pour des dimensions déterminées, attendu que les accumulateurs n'occupent pas une *place utile,* contrairement à ce qui se présente dans la navigation des canots à vapeur, où la machine a l'inconvénient d'exiger beaucoup de place. Quant au poids, il est clair que le poids des accumulateurs est à peu près le même que celui d'une machine à vapeur et de sa provision de combustible. Ce qui précède ne s'applique cependant qu'à des trajets rapides et à la navigation de plaisance; mais s'il s'agissait de longs voyages, le poids des accumulateurs deviendrait trop considérable.

Les accumulateurs pourront encore très avantageusement être employés pour les bateaux torpilleurs, attendu que la production d'énergie électrique se fait sans bruit.

Le travail moteur absorbé en une seconde par la marche d'un bateau, dans une eau tranquille, a pour expression (Claudel) : $W = K \times \frac{AV^3}{2g}$, formule dans laquelle A représente la plus grande section transversale de la partie plongée du bateau;

V sa vitesse en mètres, par seconde, et

K un coefficient très variable qui dépend de la forme du bateau.

D'après Claudel, on pourrait admettre :

En mer, pour navires à formes pleines. . . $K = 0{,}15$ à $0{,}20$

En mer, pour bâtiments élancés . . . . . K = 0,17 à 0,10
En rivières larges, pour bateaux élancés et
de médiocres dimensions. . . . . K = 0,15 à 0,20
En rivières étroites, pour bateaux rapides
très allongés. . . . . K = 0,20 à 0,30

Connaissant la valeur de W, on déterminera très aisément, comme nous l'avons vu pour la traction des tramways, les facteurs de l'énergie électrique équivalente et le groupement des accumulateurs à adopter.

3. — TRACTION DES CHEMINS DE FER SOUTERRAINS ET AÉRIENS.

La traction à vapeur des chemins de fer souterrains présente de grands inconvénients ; la fumée, la vapeur, la mauvaise odeur et, par conséquent, l'insalubrité des tunnels, doivent engager les ingénieurs à étudier, d'une façon sérieuse, la substitution de l'électricité à la vapeur. Il existe encore, en faveur de l'électricité, un avantage au point de vue économique, avantage qui était déjà signalé, en février 1880, par M. Hospitalier.

Dans les usines centrales productrices de l'électricité se trouveront de puissantes « machines à vapeur perfectionnées à grande détente qui ne dépensent pas plus de 1 kilogramme de charbon par heure et par cheval-vapeur ; la dépense des locomotives à grande puissance atteint 3 kilogrammes et celle des machines plus petites, tramways à vapeur, par exemple, dépasse 4,55 kilogrammes dans les mêmes conditions. ».

Il s'ensuit donc que le faible rendement de la traction

par accumulateurs peut même compenser la consommation de charbon supplémentaire exigée par des petites machines qui produisent la même quantité de travail.

En ce qui concerne les chemins de fer aériens, il y a lieu de craindre, dans la traction à vapeur, la chute des escarbilles, et, par suite, les dangers d'incendie. Cet inconvénient, joint à celui qui résulte de la fumée, doit tendre à remplacer la traction à vapeur par la traction électrique.

4. — AÉROSTATION.

« Le problème de la direction des ballons est aujourd'hui *pratiquement résolu*. Les plus sceptiques ne peuvent plus élever un doute. La France possède aujourd'hui un petit navire de l'air; elle fera construire, dès qu'elle le voudra, le vaisseau de ligne de l'Océan aérien. »

C'est par ces mots que M. Hervé Mangon, dans la séance du 10 novembre 1884, de l'Académie des sciences de Paris, terminait une note sur l'aérostat dirigeable de MM. Renard et Krëbs.

La navigation aérienne, qui est appelée à produire une véritable révolution sociale, n'est plus qu'une question de mois.

Lorsque M. Jacobi, en 1838, imagina son moteur pour naviguer sur la Néva, ce fut des couples Daniell qu'il employa pour actionner le moteur; la vitesse qu'il obtint ne fut que 2 300 mètres par heure; dans les expériences entreprises l'année dernière, sur la Tamise, au

moyen des accumulateurs Faure, on dépassa 12 kilomètres à l'heure ; comme on le voit, la navigation électrique avait fait des progrès dans cet intervalle.

Il est hors de doute pour tout esprit quelque peu clairvoyant, que la navigation aérienne, dans un avenir très rapproché, fera l'objet d'exploitations industrielles absolument au même titre que les chemins de fer et la navigation à vapeur.

Alors on reconnaîtra que la production de l'énergie électrique, au moyen de piles primaires, est trop coûteuse, et on sera naturellement forcé de recourir aux accumulateurs, comme on tend actuellement à le faire pour la propulsion des bateaux.

5. — TRACTION DES VOITURES.

Le jour où les usines centrales d'électricité auront pris une importante extension, les accumulateurs trouveront une application aussi intéressante qu'économique dans la traction des voitures. En effet, combien de personnes ne sont-elles pas désirables d'avoir chevaux et voitures, de *rouler carrosse,* suivant l'expression vulgaire. Mais le cheval, malheureusement, doit manger tous les jours, et le cheval entraîne à sa suite l'entretien d'un domestique. Or, si, par suite des occupations journalières, la voiture ne doit faire que quelques sorties par semaines, on conçoit que les frais de chaque sortie soient excessivement élevés.

Admettons que l'électricité soit canalisée dans les

habitations particulières, absolument comme le gaz. Vous avez chez vous, par exemple, un tricycle électrique ou une voiture à 2 places, à 4 places, etc. ; voyant le matin que la journée promet d'être favorisée par le beau temps, vous projetez, pour l'après-midi, une promenade en voiture. N'est-il pas vrai qu'il vous suffira d'ouvrir un simple robinet électrique pour effectuer la charge de la batterie d'accumulateurs installée dans des parties non utilisables de votre voiture. Connaissant approximativement la quantité d'énergie dont vous aurez besoin pour une promenade de 2, 3, 4, etc. heures, il vous sera très facile de donner à la batterie un approvisionnement d'énergie suffisant.

Le coût de l'électricité nécessaire à la charge sera des plus minimes et il est très probable que cette application, après avoir été l'objet d'un luxe, finira par entrer dans les besoins ordinaires de la vie d'un grand nombre d'entre nous. On aura chez soi son tricycle électrique, son dockar, son landau, etc. Ce que l'avenir nous réserve est un bien gros point d'interrogation !

§ 4.

UTILISATION DES FORCES NATURELLES.

Grâce aux travaux remarquables de M. Marcel Deprez sur le transport de la force à grande distance, et à l'énergique persévérance de ce savant, le moment est venu où l'ingénieur doit rechercher la bonne solution du problème suivant : Y a-t-il possibilité d'utiliser au loin les forces naturelles telles que les chutes d'eau, les marées, le vent, etc., et de quelle manière cette utilisation pourra-t-elle se faire ?

Si un ingénieur avait eu l'audace de poser ce problème, il y a vingt ans, on l'eût traité d'insensé, pour ne pas dire davantage. Il n'en est plus de même aujourd'hui. Depuis quelques années l'électricité a marché à pas de géant, et c'est elle qui, certainement, conduira dans un avenir très prochain à la solution du problème relatif à l'utilisation des forces naturelles.

On semble attendre, avec une certaine anxiété, les résultats des expériences que M. Marcel Deprez doit entreprendre, dans deux mois, à Creil, pour démontrer la possibilité de la transmission de la force à grande distance. Il est hors de doute pour tous ceux qui sont au courant de l'état actuel de nos connaissances électriques, que, si ces expériences ne donnent pas un résultat absolument concluant, ce fait ne pourra provenir que d'un défaut de construction de machines ou

de malveillance. (Il y a tant de gens qui éprouveraient une méchante satisfaction si les expériences échouaient!) Une fois ce problème résolu, et il est évident que l'année 1885 ne se passera pas sans qu'une solution ait été trouvée, il s'agira de savoir comment on utilisera les forces naturelles.

M. Ch. Street vient, dans le courant de décembre dernier, d'appeler l'attention des électriciens sur l'utilisation des chutes d'eau et des marées. Les deux articles qu'il a fait paraître dans *la Lumière électrique* visent surtout la France.

On est réellement frappé lorsqu'on lit le chiffre du nombre de chevaux-vapeur qui sont employés journellement dans les diverses exploitations.

Dans notre petite Belgique, d'après la statistique de 1882, la force en chevaux-vapeur a été pour :

les chemins de fer.	de	394 995	ch.-v.
la navigation.	»	6 843	»
les industries de toute sorte	»	279 985	»
Total.		681 823	ch.-v.

La statistique de 1881 a donné, pour la France et l'Algérie, d'après M. Street :

Chemins de fer	2 731 307	ch.-v.
Navigation (non comp. la marine militaire).	348 289	»
Industries de toute sorte	581 352	»
Total.	3 660 948	ch.-v.

La consommation du charbon, allant en augmentant

d'année en année, il arrivera un jour où nos mines de houille seront épuisées.

MM. Jevons et Stephenson n'ont-ils pas dit que, dans 90 ans, les houillères d'Angleterre seraient épuisées? Alors il faudra s'adresser à des pays étrangers pour obtenir le charbon qu'on paiera évidemment à des prix très élevés.

Les ingénieurs devraient donc se préoccuper, d'une façon toute spéciale, de la substitution des forces naturelles, au moyen de l'électricité, à la vapeur et au gaz lui-même qui nécessite, pour sa production, une dépense considérable en combustible.

Sans doute, on s'est borné jusqu'ici à n'utiliser qu'un petit nombre de chutes d'eau, parce que les moyens dont on disposait pour la transmission de la force ne permettaient pas aux industriels d'employer l'énergie de ces chutes à une grande distance de celles-ci.

Mais l'électricité réalisant le transport de la force à grande distance, « ouvrira un débouché d'une grande importance à l'utilisation des forces hydrauliques. »

Et puis, l'énergie des marées n'est-elle déjà pas utilisée en France dans toute espèce d'industrie? Et pourquoi n'étenderait-on pas cette utilisation, alors que, grâce à l'électricité, on pourra transporter au loin cette force perdue jusqu'ici? Nous renverrons nos lecteurs à l'article de M. Street (*Lumière électrique,* numéro du 20 décembre 1884) sur le système qu'il préconise pour l'utilisation des marées. La conclusion qu'il est permis de tirer d'une série de cas qu'il énumère est « que cette

partie du problème pour la génération en grand de l'électricité dynamique est résolu et ne fait aucun doute quant à sa réussite complète. »

Quant à la force du vent, ne suffit-il pas de rappeler l'existence des moulins à vent pour montrer combien il est facile de capter son énergie ?

Ici se pose la question suivante : Faudra-t-il utiliser directement le transport de la force exploitée ? A notre avis, ce ne serait résoudre le problème qu'à moitié. En effet, si l'on se sert du transport direct, on ne pourra l'utiliser que pendant les heures de travail, et on n'arrivera sensiblement qu'à une moyenne de 3 000 heures par an. Que l'on emmagasine, au contraire, cette énergie dans des accumulateurs, n'est-il pas vrai que l'on pourra la capter pendant plus du double d'heures ?

En outre, comme le fait très bien remarquer M. Reynier, quand la force exploitée est irrégulière, le transport direct n'utilise que son *travail minimum ;* les accumulateurs permettraient d'utiliser son *travail moyen*.

D'ailleurs, il se présentera bien des cas où l'irrégularité de la force empêchera son utilisation par un transport direct, alors que, par les accumulateurs, « les forces intermittentes deviendront exploitables ».

Nous dirons donc avec M. Reynier que « sans trop escompter l'avenir, on peut affirmer que les accumulateurs apportent dans le transport de l'énergie, comme dans la plupart des autres problèmes électriques, un élément qu'il n'est plus permis de négliger ».

§ 5.

APPLICATION A LA TÉLÉGRAPHIE ET A LA TÉLÉPHONIE.

Cette application est appelée à devenir des plus importantes, surtout depuis que les appareils et dispositions imaginés par M. Van Rysselberghe rendent possibles, par les mêmes fils, la télégraphie et la téléphonie simultanées.

Par son dispositif, M. Van Rysselberghe introduit, dans chaque circuit, une résistance supplémentaire fixe de 1 500 ohms environ, par suite de l'adjonction d'un *électro-graduateur*.

Une conséquence directe de l'application du système Van Rysselberghe, disait M. l'inspecteur des télégraphes Banneux, dans *l'Ingénieur conseil*, n° 14 du 29 février 884, est le renforcement des piles télégraphiques pour tenir compte de cette résistance supplémentaire.

En Belgique, ce sont généralement les éléments Leclanché qui sont en faveur dans la télégraphie et la téléphonie. Or, la résistance intérieure de ces éléments est en moyenne de 2 ohms.

Remplacez ces éléments essentiellement résistants par des couples à très faible résistance intérieure et vous pourrez ainsi réduire le renforcement des piles recommandé par M. Banneux.

De toutes les piles connues jusqu'ici, ce sont les accumulateurs qui possèdent la plus faible résistance

intérieure. Ainsi les piles secondaires à base de plomb peuvent n'avoir que $0^{ohm},005$ de résistance.

On employera donc, avec beaucoup de succès, les accumulateurs dans la télégraphie et la téléphonie simultanées par les mêmes fils.

Si nous examinions séparément les exploitations télégraphiques et téléphoniques, nous nous empresserions de dire que partout où se trouve un nombre considérable de postes, il y a un avantage économique très accentué à employer des couples secondaires qu'on chargerait périodiquement. Cet avantage a été nettement démontré, en France et en Angleterre, pour les villes de Paris et de Londres.

CONCLUSION.

La conclusion que nous pouvons tirer de ce livre, c'est que les accumulateurs électriques, sainement appliqués, sont destinés à jouer un grand rôle dans la science et dans l'industrie électrique. Ils constituent désormais des facteurs qu'il n'est plus permis de négliger dans les applications de l'électricité.

Nous renvoyons, à notre tour, l'épithète d'utopistes à ceux qui veulent essayer, par des attaques insensées, de faire disparaître les accumulateurs de la scène du monde.

Que dirait-on de celui qui voudrait supprimer la cloche dans la fabrication du gaz et le réservoir dans la distribution d'eau? Aujourd'hui on le traiterait sans doute de pauvre d'esprit. Et cependant, les accumulateurs électriques sont-ils autre chose que des *réservoirs* d'électricité ?

Plus tard on s'étonnera certainement d'avoir entendu de bons esprits formuler des critiques aussi absurdes que ridicules sur l'emploi des piles secondaires.

Le progrès marche bien lentement quand il doit lutter contre la finance. Mais ayons confiance dans l'avenir : le progrès, s'il est lent, n'en est pas moins assuré.

TABLE DES MATIÈRES.

PAGES.

PRÉFACE V

INTRODUCTION.

§ 1. — Définitions et principes 1
§ 2. — Intensité du courant électrique 6
§ 3. — Force électro-motrice 12
§ 4. — Résistance 16
§ 5. — Relations existant entre l'intensité du courant électrique, la force électro-motrice et la résistance 19
§ 6. — Association des piles primaires et secondaires 21
§ 7. — Unités électriques 23

PREMIÈRE PARTIE.

ÉTUDE THÉORIQUE ET DESCRIPTIVE DES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE PREMIER.

COURANTS SECONDAIRES.

§ 1. — Considérations générales 29
§ 2. — Courants secondaires produits par divers métaux 35
Voltamètre ou accumulateur au platine 39
Id. Id. au cuivre 41
Id. Id. au plomb 45
Id. Id. au zinc 49
Id. Id. au fer 51
Conclusions 51
§ 3. — Polarisation des accumulateurs 53
Classification des accumulateurs 61

§ 4. — Recherche de l'accumulateur possédant la force électro-motrice maxima 62
§ 5. — Conditions théoriques et pratiques d'un accumulateur industriel 68

CHAPITRE II.

DESCRIPTION DES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

§ 1. — Accumulateur Planté. 71
§ 2. — Id. de Meritens.. 84
§ 3. — Id. Arnould et Tamine 87
§ 4. — Id. de Kabath 96
§ 5. — Id. Faure. 98
§ 6. — Id. Volckmar. 111
§ 7. — Id. Houston et Thomson 114
§ 8. — Id. d'Arsonval 116
§ 9. — Id. Sutton. 130
§ 10. — Id. Reynier 133
§ 11. — Id. à plaques agglomérées 140
§ 12. — Accumulateurs divers. 149

DEUXIÈME PARTIE.

ÉTUDE SUR L'EMPLOI ET LE MÉRITE DES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

§ 1. — Loi de décomposition électro-chimique. 159
§ 2. — Actions chimiques produites dans les accumulateurs électriques 165
§ 3. — Formation des accumulateurs. 176
§ 4. — Charge 188
§ 5. — Décharge 202
§ 6. — Rendement. 210
§ 7. — Capacité. 226
§ 8. — Durée 241
§ 9. — Poids 245

§ 10. — Considérations sur les détails et les accessoires des accumulateurs 249
1° Récipient. 249
2° Couvercle. 255
3° Accessoires des électrodes 258
Tableau résumant l'emploi et le mérite des accumulateurs. 261

TROISIÈME PARTIE.

APPLICATIONS DIVERSES DES ACCUMULATEURS ÉLECTRIQUES.

§ 1. — Applications préconisées par M. Planté. 263
§ 2. — Application des accumulateurs à l'éclairage électrique. . . 272
§ 3. — Application des accumulateurs à la traction. 297
1. — Traction des tramways 297
2. — Application des accumulateurs à la navigation . 317
3. — Traction des chemins de fer souterrains et aériens. 319
4. — Aérostation 320
5. — Traction des voitures. 321
§ 4. — Utilisation des forces naturelles 323
§ 5. — Application à la télégraphie et à la téléphonie 327
Conclusion 329

89089716922

B89089716922A

89089716922

b89089716922a